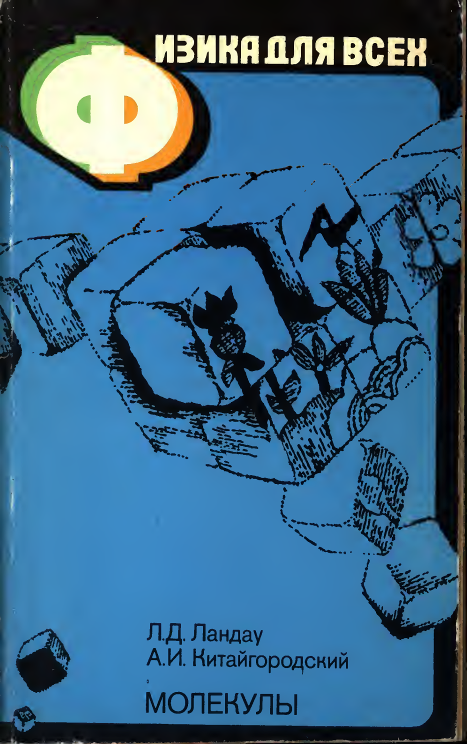

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ
Л.Д. Ландау
А.И. Китайгородский
МОЛЕКУЛЫ

Библиотечная серия



Л.Д. Ландау
А.И. Китайгородский

МОЛЕКУЛЫ

Издание четвертое, исправленное и дополненное



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1978

530.1
Л 22
УДК 530.1

АННОТАЦИЯ

Переиздание второй части книги Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского «Физика для всех» (Движение, теплота). Цель книги дать читателю в общедоступной форме отчетливое представление об основных идеях и новейших достижениях современной физики. Читатель познакомится с различными фазовыми состояниями вещества, со структурой и свойствами жидких и твердых растворов, с химическими реакциями и законом сохранения энергии на языке молекул. В этом выпуске серии «Физика для всех», так же как и в двух последующих («Электроны» и «Фотоны и ядра»), продолжается изложение основ физики.

Книга рассчитана на самый широкий круг читателей — от впервые знакомящихся с физикой до лиц с высшим образованием, проявляющих интерес к данной науке. Книга явится прекрасным пособием для учителей и поможет им оживить преподавание физики в школе.

Л $\frac{20401-087}{053(02)-78}$ 128-78

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ

Этой книге дано название «Молекулы». В нее вошли без изменений многие главы из второй половины прежней книги «Физики для всех» Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского.

Книга посвящена в основном разнообразным аспектам учения о строении вещества. Однако атом остается здесь пока тем, чем он был для Демокрита,— неделимой частицей. Разумеется, в книге затронуты и проблемы, связанные с движением молекул. Ведь они лежат в основе современного понимания тепловых явлений. И, конечно, в ней не оставлены без внимания вопросы, касающиеся фазовых переходов.

За годы, прошедшие со времени выхода предыдущих изданий «Физики для всех», резко возросли наши сведения о строении молекул, об их взаимодействии друг с другом. Много мостиков было перекинуто между проблемами молекулярной структуры вещества и его свойствами. Это обстоятельство побудило меня включить в эту книгу довольно значительный по объему новый материал.

Мне кажется, что давно уже наступило время введения в стандартные учебники общих сведений о молекулах, которые более сложны, чем молекулы кислорода, азота и углекислого газа. До сего времени в большинстве курсов физики авторы не считают нужным вести разговор о более сложных комбинациях атомов. А ведь макромолекулы прочно вошли в наш быт в виде разнообразных синтетических материалов! Создана молекулярная биология, которая объясняет явления жизни на языке молекул белков и нуклеиновых кислот.

Точно так же незаслуженно опускаются обычно вопросы, касающиеся химических реакций. А ведь речь идет о физическом процессе столкновения молекул, сопровождающемся их перестройкой. Насколько легче объяснить слушателю или читателю сущность ядерных реакций, если он знаком с совершенно аналогичным поведением молекул.

При переработке книги оказалось целесообразным перенести некоторые разделы прежней «Физики для всех» в последующие выпуски.

В частности, мы сочли возможным ограничиться лишь несколькими словами о звуке в главе, посвященной молекулярной механике.

Точно так же показалось целесообразным отложить разговор об особенностях волнового движения до рассмотрения электромагнитных явлений.

В целом четыре выпуска нового издания «Физики для всех» («Физические тела», «Молекулы», «Электроны», «Фотоны и ядра») будут охватывать изложение основ физики.

Апрель 1978 *А. И. Китайгородский*

Глава 1

КИРПИЧИ МИРОЗДАНИЯ

ЭЛЕМЕНТЫ

Из чего построен окружающий нас мир? Первые дошедшие до нас ответы на этот вопрос родились в Древней Греции более 25 веков тому назад.

Ответы кажутся на первый взгляд донельзя странными, и мы должны были бы потратить много бумаги, чтобы объяснить читателю логику древних мудрецов — Фалеса, утверждавшего, что все состоит из воды, Анаксимена, говорившего, что мир построен из воздуха, или Гераклита, по мнению которого все состоит из огня.

Несообразность подобных объяснений заставила более поздних греческих «любителей мудрости» (так переводится слово «философ») увеличить число первооснов или, как их называли в древнем мире, элементов. Эмпедокл утверждал, что элементов четыре: земля, вода, воздух и огонь. В это учение внес окончательные (на очень долгое время) поправки Аристотель.

Согласно Аристотелю, все тела состоят из одного и того же вещества, но это вещество может принимать различные свойства. Этих невещественных элементов-свойств четыре: холод, тепло, влажность и сухость. Соединяясь по два и будучи приданы веществу, элементы-свойства Аристотеля образуют элементы Эмпедокла. Так, сухое и холодное вещество дает землю, сухое и горячее — огонь, влажное и холодное — воду и, наконец, влажное и горячее — воздух.

Впрочем, ввиду трудности ответа на ряд вопросов философы древности добавили к четырем элементам-свойствам еще «божественную квинтэссенцию». Это

что-то вроде бога-повара, сваривающего воедино разнородные элементы-свойства. Ссылкой на бога, разумеется, нетрудно дать разъяснение любому недоумению.

Впрочем, очень долгое время — почти вплоть до XVIII в.— мало кто отваживался недоумевать и задавать вопросы. Учение Аристотеля было признано церковью, и сомнение в его справедливости было ересью.

И все же сомнения эти возникали. Породила их алхимия.

В далекие времена, в глубь которых мы можем заглянуть, читая древние рукописи, человек знал, что все окружающие нас тела способны превращаться в другие. Горение, обжиг руды, сплавление металлов — все эти явления были хорошо известны.

Это, казалось бы, не противоречило учению Аристотеля. При любом превращении менялась, так сказать, «дозировка» элементов. Если весь мир состоит всего лишь из четырех элементов, то возможности превращения тел должны быть очень велики. Нужно найти лишь секрет, как сделать, чтобы из любого тела можно было получать любое другое.

До чего заманчива задача сделать золото, или найти особый, необыкновенный «философский камень», дающий его обладателю богатство, власть, вечную молодость. Науку об изготовлении золота, философского камня, о превращении любого тела в любое другое древние арабы назвали алхимией.

Столетиями продолжалась работа людей, посвятивших себя решению этой задачи. Алхимики не научились делать золото, не нашли философского камня, но зато собрали много ценных фактов о превращении тел. Эти факты послужили в конце концов смертным приговором для алхимии. В XVII в. многим стало ясно, что число основных веществ — элементов несравненно больше четырех. Ртуть, свинец, сера, золото, сурьма оказались неразлагаемыми веществами, уже нельзя было говорить, что эти вещества построены из элементов. Пришлось, напротив, причислить их к элементам мира.

В 1668 г. в Англии вышла в свет книга Роберта Бойля «Скептический химик, или сомнения и парадоксы относительно элементов алхимиков». Здесь мы находим совершенно новое определение элемента. Это уже не неуловимый, таинственный невещественный

элемент алхимиков. Теперь элемент — это вещество, составная часть тела.

Это укладывается в современное определение понятия элемента.

Список элементов Бойля был невелик. К правильному списку Бойль присоединил еще и огонь. Впрочем, идеи об элементах-свойствах жили и после него. Даже в списке великого француза Лавуазье (1743—1794), которого считают основателем химии, наряду с действительными элементами фигурируют и невесомые элементы: теплотвор и световое вещество.

В первой половине XVIII в. было известно 15 элементов, а к концу века число их возросло до 35. Правда, лишь 23 из них — действительные элементы, остальные же — или несуществующие элементы, или вещества, как едкий натр и калий, которые оказались сложными.

К середине XIX в. в химических руководствах описывалось уже свыше 50 неразложимых веществ.

Толчком для сознательных поисков неоткрытых элементов явился периодический закон великого русского химика Менделеева. Здесь еще рано говорить об этом законе. Скажем лишь, что своим законом Менделеев установил, как надо искать еще не открытые элементы.

К началу XX в. были открыты почти все встречающиеся в природе элементы.

АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ

Около 2000 лет назад в Древнем Риме была написана оригинальная поэма. Ее автором был римский поэт Лукреций Кар. «О природе вещей» — так называлась поэма Лукреция.

Звучными стихами рассказал Лукреций в своем поэтическом произведении о взглядах древнегреческого философа Демокрита на мир.

Что это были за взгляды? Это было учение о мельчайших, невидимых частичках, из которых построен весь наш мир. Наблюдая различные явления, Демокрит пытался дать им объяснение.

Вот, например, вода. При сильном нагревании она превращается в невидимый пар и улетучивается. Как

это можно объяснить? Ясно, что такое свойство воды связано с ее внутренним строением.

Или почему, например, мы ощущаем запахи цветов на расстоянии?

Размышляя над подобными вопросами, Демокрит пришел к убеждению, что тела только кажутся нам сплошными, на самом же деле они состоят из мельчайших частиц. У различных тел эти частицы различны по форме, но они настолько малы, что увидеть их невозможно. Поэтому-то любое тело и кажется нам сплошным.

Демокрит назвал такие мельчайшие, неделимые далее частички, из которых состоят вода и все другие тела, «атомами», что по-гречески означает «неделимые».

Замечательная догадка древнегреческих мыслителей, родившаяся 24 века назад, позднее была надолго забыта. Более тысячи лет в ученом мире безраздельно господствовало ошибочное учение Аристотеля.

Утверждая, что все вещества могут взаимно превращаться друг в друга, Аристотель категорически отрицал существование атомов. Любое тело можно делить до бесконечности,— учил Аристотель.

В 1647 г. француз Пьер Гассенди издал книгу, в которой смело отрицал учение Аристотеля и утверждал, что все вещества в мире состоят из неделимых частичек — атомов. Атомы отличаются друг от друга формой, размерами и массой.

Соглашаясь с учением древних атомистов, Гассенди развил это учение дальше. Он объяснил, каким именно образом могут возникать и возникают в мире миллионы разнообразных тел природы. Для этого, утверждал он, не нужно большого числа различных атомов. Ведь атом — это все равно что строительный материал для домов. Из трех различных видов стройматериалов — кирпичей, досок и бревен — можно построить огромное число самых разнообразных домов. Точно так же из нескольких десятков различных атомов природа может создать тысячи разнообразнейших тел. При этом в каждом теле различные атомы соединяются в небольшие группы; эти группы Гассенди назвал «молекулами», т. е. «массочками» (от латинского слова «молес» — масса).

Молекулы различных тел отличаются одна от другой числом и видом («сортом») входящих в них атомов.

Нетрудно сообразить, что из нескольких десятков различных атомов можно создать огромное количество различных их комбинаций — молекул. Вот почему так велико разнообразие окружающих нас тел.

Однако еще многое во взглядах Гассенди было ошибочно. Так, он считал, что имеются особые атомы для тепла, холода, вкуса и запаха. Как и другие ученые того времени, он не мог полностью освободиться от влияния Аристотеля, признавал его невещественные элементы.

В сочинениях М. В. Ломоносова — великого просветителя и основателя науки в России — содержатся следующие мысли, получившие подтверждение на опыте много позднее.

Ломоносов пишет, что молекула может быть однородной и разнородной. В первом случае в молекуле группируются однородные атомы. Во втором — молекула состоит из атомов, отличных один от другого. Если какое-либо тело составлено из однородных молекул, то его надо считать простым. Наоборот, если тело состоит из молекул, построенных из различных атомов, Ломоносов называет его смешанным.

Теперь мы хорошо знаем, что различные тела природы имеют именно такое строение. В самом деле, возьмем, например, газ кислород; в каждой его молекуле содержится по два одинаковых атома кислорода. Это молекула простого вещества. Если же атомы, составляющие молекулы, различны,— это уже «смешанное», сложное химическое соединение. Молекулы его состоят из атомов тех химических элементов, которые входят в состав этого соединения.

Можно сказать и иначе — каждое простое вещество построено из атомов одного химического элемента; сложное вещество включает в себя атомы двух и более элементов.

Ряд мыслителей говорили об атомах, приводя логические доводы в пользу их существования. По-настоящему ввел атомы в науку и сделал их предметом исследования английский ученый Дальтон. Дальтон показал, что существуют химические закономерности, которые можно объяснить лишь используя представления об атомах.

После Дальтона атомы прочно вошли в науку. Однако еще очень долго находились ученые, которые «не

верили в атомы». Один из них писал в самом конце прошлого века, что через несколько десятилетий атомы «удастся разыскать лишь в пыли библиотек».

Сейчас подобные суждения кажутся смешными. Мы знаем сейчас так много подробностей о «жизни» атома, что сомневаться в его существовании — все равно, что подвергать сомнению реальность Черного моря.

Относительные массы атомов определили химики. Сначала за единицу атомной массы была принята масса атома водорода. Относительная атомная масса азота оказалась равной примерно 14, кислорода — примерно 16, хлора — примерно 35,5. Впоследствии был сделан несколько иной выбор относительных единиц атомной массы, в которых число 16,0000 приписывалось природному кислороду. Атомная масса водорода оказалась равной в этой шкале 1,008.

Разумеется, интересно знать не только относительные массы атомов, но и их абсолютные значения. Достаточно для этой цели измерить абсолютную массу атома какого-либо одного сорта. В настоящее время решено взять за основу не кислород и не водород, а углерод. До сих пор исследователь относился с недоверием к измерениям абсолютных масс атомов и поступал следующим образом. Он принимал массу изотопа углерода ^{12}C равной в точности двенадцати единицам атомной массы m_A. Далее, не обращая внимания на точность измерений абсолютных масс атомов, он полагал

$$m_A = 1{,}662 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Это число во всяком случае не сильно отличается от истинного. Но, пожалуй, это излишняя осторожность, так как точность, достигнутая сегодня, равна примерно одной миллионной доле. За сто лет произошел большой прогресс. В 1875 г. мы знали m_A с точностью порядка 30%.

Как же измеряется масса атома в граммах? Разумеется, физики не изготовляли весов, на которые можно положить один атом и уравновесить его гирькой. И сто лет тому назад и сейчас физики пользуются для этой цели косвенными опытами, однако ничуть не менее достоверными, чем прямое взвешивание. Но без взвешивания все же не обойтись! Только на весы кладется

не атом, а твердый шарик из углерода ^{12}C (на самом деле приходится поступать несколько иначе, но нам важно пояснить вам идею измерения, и поэтому надеюсь, сведущий читатель простит нам упрощение). Зная массу шарика и его размер, можно определить его плотность. Вещество должно представлять собой идеальный кристалл. Этого достигнуть нелегко, но более или менее возможно. Если так, то можно считать, что найденная на опыте плотность ρ может быть представлена следующим равенством:

$$\rho = \frac{Zm_A}{V}.$$

Здесь V — объем элементарной ячейки кристалла, а Z — число атомов, приходящихся на ячейку (см. стр. 50). Обе эти величины определяются методом рентгеноструктурного анализа, о котором будет рассказано в книге 4.

Читатель не должен быть в претензии, что я забегаю вперед. Книгу по физике надо прочитать по крайней мере два раза.

Вот этим то способом удается определить с большой точностью атомную единицу массы. Число, пользующееся сегодня наибольшим доверием, таково:

$$m_A = (1{,}66043 \pm 0{,}00031) \cdot 10^{-24} \text{ г}.$$

Теперь мы можем обратиться к воображению читателя и дать ему возможность почувствовать малость этой цифры. Представьте себе, что у каждого человека на земном шаре вы потребуете по миллиарду молекул. Сколько же вещества соберется таким образом? Несколько миллиардных долей грамма.

Или еще такое сравнение: земной шар во столько раз тяжелее яблока, во сколько раз яблоко тяжелее атома водорода.

Обратная величина от единицы атомной массы называется числом Авогадро:

$$N_A = \frac{1}{m_A} = 6{,}0220943 \cdot 10^{23}.$$

Это огромное число имеет следующий смысл. Возьмем вещество в таком количестве, чтобы число граммов равнялось относительной массе атома или молекулы M,

например 12 граммов изотопа углерода ^{12}C. Можно сказать и короче: возьмем вещество в количестве одного моля (сверьтесь, пожалуйста, с определением моля, которое было дано в книге 1, когда мы вводили в обиход систему единиц СИ). Масса одного моля равна Mm_A. Поэтому число атомов углерода в 12 граммах углерода, а также число атомов, молекул или любых других частиц в одном моле собрания этих частиц равно

$$\frac{M}{Mm_A} = N_A,$$

т. е. равно числу Авогадро.

Долгое время физики не считали нужным пользоваться понятием «количества вещества». До тех пор пока мы имели дело только с атомами и молекулами, нас вполне устраивало определение моля как молекулярного (атомного) веса, выраженного в граммах.

Но на сцену вышли ионы, электроны, мезоны... Пришли к выводу, что характеризовать собрание частиц их массой не всегда удобно. Так появилась единица количества вещества — моль. Когда мы говорим «моль электронов», «моль ядер атома свинца» или «моль пи-мезонов», мы теперь имеем в виду не массу этих частиц (которая, как вы узнаете в свое время, зависит от их скорости движения), а только их число. Но старое определение моля сохраняет свою силу, ибо N_A любых атомов или молекул практически имеет массу, равную атомной или молекулярной массе, выраженной в граммах. И число Авогадро не изменило смысла, оно лишь получило теперь наименование: моль$^{-1}$.

ЧТО ТАКОЕ ТЕПЛОТА?

Чем отличается горячее тело от холодного? На этот вопрос вплоть до начала XIX в. отвечали так: горячее тело содержит больше теплорода (или теплотвора), чем холодное. Совершенно так же, как суп более соленый, если содержит больше соли. А что такое теплород? На это следовал ответ: «Теплород — это тепловая материя, это элементарный огонь». Таинственно и непонятно. А по сути дела, это ответ такой же, как объяснение, что такое веревка: «Веревка — это вервие простое».

Наряду с теорией теплорода уже давно существовал другой взгляд на природу теплоты. Его отстаивали с большим блеском многие выдающиеся ученые XVI—XVIII столетий.

Фрэнсис Бэкон в своей книге «Новый органон» писал: «Сама теплота в своей сущности есть не что иное, как движение... Теплота состоит в переменном движении мельчайших частей тела».

Роберт Гук в книге «Микрография» утверждал: «Теплота есть непрерывное движение частей тела... Нет такого тела, частички которого были бы в покое».

Особенно отчетливые высказывания такого же рода мы находим у Ломоносова (1745 г.) в его работе «Размышления о причине тепла и холода». В этом сочинении отрицается существование теплорода и говорится, что «теплота состоит во внутреннем движении частичек материи».

Очень образно говорил Румфорд в конце XVIII в.: «Тело тем горячее, чем интенсивнее движутся частички, из которых оно построено, подобно тому как колокол звучит тем громче, чем сильнее он колеблется».

В этих замечательных догадках, намного опередивших свое время, кроются основы наших современных взглядов на природу тепла.

Бывают иногда тихие, спокойные, ясные дни. Листочки на деревьях замерли, даже легкая рябь не возмутит водяной глади. Все окружающее застыло в строгой торжественной неподвижности. Покоится видимый мир. Но что при этом происходит в мире атомов и молекул?

Физика наших дней может много рассказать об этом. Никогда, ни при каких условиях не прекращается невидимое движение частичек, из которых построен мир.

Почему же мы не видим всех этих движений? Частицы движутся, а тело покоится. Как это может быть?..

Не приходилось ли вам когда-либо наблюдать рой мошек? В безветренную погоду рой как бы висит в воздухе. А внутри роя идет интенсивная жизнь. Сотня насекомых метнулась вправо, но в этот же момент столько же метнулось влево. Весь рой остался на том же месте и не изменил своей формы.

Невидимые движения атомов и молекул носят такой же хаотический, беспорядочный характер. Если какие-

то молекулы ушли из объема, то их место заняли другие. А так как новые пришельцы ничуть не отличаются от ушедших молекул, то тело остается все тем же. Беспорядочное, хаотическое движение частиц не меняет свойств видимого мира.

Однако не пустой ли это разговор, может спросить нас читатель. Чем эти, пусть красивые, рассуждения доказательнее теории теплорода? Разве кто-нибудь видел вечное тепловое движение частичек вещества?

Тепловое движение частичек можно увидеть и притом при помощи самого скромного микроскопа. Первым наблюдал это явление еще более ста лет назад английский ботаник Броун.

Рассматривая под микроскопом внутреннее строение растения, он заметил, что крошечные частички вещества, плавающие в соке растения, беспрерывно движутся во всех направлениях. Ботаник заинтересовался, какие силы заставляют частички двигаться? Может быть, это какие-то живые существа? Ученый решил рассмотреть под микроскопом мелкие частички глины, взмученные в воде. Но и эти, несомненно неживые, частички не находились в покое, они были охвачены непрерывным хаотическим движением. Чем меньше частички, тем быстрее они двигались. Долго рассматривал ботаник эту каплю воды, но так и не мог дождаться, когда движение частичек прекратится. Их будто постоянно толкали какие-то невидимые силы.

Броуновское движение частиц — это и есть тепловое движение. Тепловое движение присуще большим и малым частичкам, сгусткам молекул, отдельным молекулам и атомам.

ЭНЕРГИЯ СОХРАНЯЕТСЯ ВСЕГДА

Итак, мир построен из движущихся атомов. Атомы обладают массой, движущийся атом обладает кинетической энергией. Конечно, масса атома невообразимо мала, поэтому и энергия его будет крошечной, но ведь атомов миллиарды миллиардов.

Теперь напомним читателю, что хотя мы говорили о законе сохранения энергии, но это не был достаточно универсальный закон сохранения. Импульс и момент

сохранялись в опыте, а энергия сохранялась только в идеале — при отсутствии трения. На самом же деле энергия всегда уменьшалась.

Но раньше мы ничего не говорили об энергии атомов. Возникает естественная мысль: там, где на первый взгляд мы отмечали уменьшение энергии, на самом деле незаметным для глаза способом энергия передавалась атомам тела.

Атомы подчиняются законам механики. Правда (это вам придется узнать из другой книги), их механика несколько своеобразна, но это дела не меняет — в отношении закона сохранения механической энергии атомы ничуть не отличаются от больших тел.

Значит, полное сохранение энергии обнаружится лишь тогда, когда наряду с механической энергией тела будет учтена внутренняя энергия этого тела и окружающей среды. Только в этом случае закон будет универсальным.

Из чего же складывается полная энергия тела? Первую ее составляющую мы, по сути дела, уже назвали — это сумма кинетических энергий всех атомов. Но не надо забывать и про то, что атомы взаимодействуют один с другим. Таким образом, добавляется еще потенциальная энергия этого взаимодействия. Итак, полная энергия тела равняется сумме кинетических энергий его частиц и потенциальной энергии их взаимодействия.

Нетрудно понять, что механическая энергия тела как целого есть только часть полной энергии. Ведь когда тело покоится, молекулы его не останавливаются и не перестают взаимодействовать одна с другой. Энергия теплового движения частиц, которая остается у покоящегося тела, и энергия взаимодействия частиц составляют внутреннюю энергию тела. Поэтому полная энергия тела равняется сумме механической и внутренней.

В механическую энергию тела как целого входит также энергия тяготения, т. е. потенциальная энергия взаимодействия частиц тела с земным шаром.

Рассматривая внуреннюю энергию, мы уже не обнаружим пропажи энергии. Когда мы рассматриваем природу через стекла, увеличивающие мир в миллионы раз, картина представляется нам на редкость гармонич-

ной. Нет никаких потерь механической энергии, а есть лишь превращение ее во внутреннюю энергию тела или среды. Пропала работа? Нет! Энергия ушла на убыстрение относительного движения молекул или изменение их взаимного расположения.

Молекулы послушны закону сохранения механической энергии. В мире молекул нет сил трения; мир молекул управляется переходами потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Лишь в грубом мире больших вещей, не замечающем молекул, «энергия пропадает».

Если в каком-либо явлении механическая энергия пропадает вся или частично, то на такую же величину возрастает внутренняя энергия тел и среды, участвующих в этом явлении. Иначе говоря, механическая энергия переходит без каких бы то ни было потерь в энергию молекул или атомов.

Закон сохранения энергии — это строжайший бухгалтер физики. В любом явлении приход и расход должны точно сойтись. Если этого не произошло в каком-либо опыте, то, значит, что-то важное ускользнуло от нашего внимания. Закон сохранения энергии в таком случае сигнализирует: исследователь, повторить опыт, увеличить точность измерений, искать причину потерь! На таком пути физики неоднократно делали новые важные открытия и еще и еще раз убеждались в строжайшей справедливости этого замечательного закона.

КАЛОРИЯ

У нас уже есть две единицы энергии — эрг и килограмм-сила-метр. Казалось бы, достаточно. Однако при изучении тепловых явлений по традиции пользуются еще и третьей единицей — калорией.

Позже мы увидим, что и калория не исчерпывает список принятых для обозначения энергии единиц.

Возможно, в каждом отдельном случае употребление «своей» единицы энергии удобно и целесообразно. Но в любом мало-мальски сложном примере, связанном с переходом энергии из одного вида в другой, возникает невообразимая путаница с единицами.

Чтобы упростить расчеты, новая система единиц (СИ) предусматривает одну единицу для работы, энергии и количества тепла — джоуль. Однако, учитывая силу традиций и тот срок, который понадобится, чтобы система стала общеупотребительной и единственной системой единиц, полезно познакомиться поближе с «уходящей» единицей количества теплоты — калорией.

Малая калория (кал) — это количество энергии, которое надо сообщить 1 г воды, чтобы нагреть его на 1 градус.

Слово «малая» надо упомянуть потому, что иногда используют «большую» калорию, которая в тысячу раз больше выбранной единицы (большая калория часто обозначается ккал, что значит «килокалория»).

Соотношение между калорией и механическими единицами работы — эргом или килограмм-сила-метром находят, нагревая воду механическим путем. Подобные опыты ставились неоднократно. Можно, например, повысить температуру воды энергичным перемешиванием. Затраченная для нагрева воды механическая работа оценивается достаточно точно. Из таких измерений было найдено:

$$1\ \text{кал} = 0{,}427\ \text{кгс}\cdot\text{м} = 4{,}18\ \text{Дж}.$$

Поскольку единицы энергии и работы общие, то в калориях можно измерять и работу. На подъем килограммовой гири на метровую высоту надо затратить 2,35 калории. Звучит это необычно, да и сопоставлять подъем груза с нагреванием воды неудобно. Поэтому в механике и не пользуются калориями.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Закон сохранения энергии мог быть сформулирован лишь тогда, когда достаточно отчетливыми стали представления о механической природе теплоты и когда техника поставила практически важный вопрос об эквиваленте между теплом и работой.

Первый опыт для установления количественного соотношения между теплом и работой был проделан известным физиком Румфордом (1753—1814). Он работал на заводе, где изготовляли пушки. Когда сверлят

дуло орудия, выделяется тепло. Как оценить его? Что принять за меру тепла? Румфорду пришло в голову работу, производимую при сверлении, поставить в связь с нагреванием того или иного количества воды на то или иное число градусов. В этом исследовании, пожалуй, впервые четко выражена мысль, что тепло и работа должны иметь общую меру.

Следующим шагом к открытию закона сохранения энергии было установление важного факта: исчезновение работы сопровождается появлением пропорционального количества теплоты, этим и была найдена общая мера теплоты и работы.

Первоначальное определение так называемому механическому эквиваленту теплоты дал французский физик Сади Карно. Этот выдающийся человек скончался в возрасте 36 лет в 1832 г. и оставил после себя рукопись, которая была опубликована лишь через 50 лет. Сделанное Карно открытие осталось неизвестным и не повлияло на развитие науки. В этой работе Карно вычислил, что подъем 1 $м^3$ воды на высоту 1 м требует такой же энергии, какая нужна для нагревания 1 кг воды на 2,7 градуса (правильная цифра 2,3 градуса).

В 1842 г. публикует свою первую работу гейльброннский врач д-р Юлиус Роберт Майер. Хотя Майер называет знакомые нам физические понятия совсем по-другому, все же внимательное чтение его работы приводит к выводу, что в ней изложены существенные черты закона сохранения энергии. Майер различает внутреннюю энергию («тепловую»), потенциальную энергию тяготения и энергию движения тела. Он пытается из чисто умозрительных заключений вывести обязательность сохранения энергии при различных превращениях. Для того чтобы проверить это утверждение на опыте, надо иметь общую меру для измерения этих энергий. Майер вычисляет, что нагревание 1 кг воды на 1 градус равноценно поднятию 1 кг на 365 м.

Во второй своей работе, опубликованной три года спустя, Майер отмечает универсальность закона сохранения энергии — возможность применения его к вопросам химии, биологии и космическим явлениям. К различным формам энергии Майер добавляет магнитную, электрическую и химическую.

Большая заслуга в открытии закона сохранения энергии принадлежит замечательному английскому физику (пивовару из Сальфорда в Англии) Джемсу Прескотту Джоулю, работавшему независимо от Майера.

Если для Майера характерна некоторая склонность к неопределенной философии, то основной чертой Джоуля является строгий экспериментальный подход к рассматриваемым явлениям. Джоуль задает природе вопрос и получает на него ответ путем исключительно тщательно поставленных специальных опытов. Нет сомнения, что во всей серии опытов, которые ставил Джоуль, он руководился одной идеей — найти общую меру оценки тепловых, химических, электрических и механических действий, показать, что во всех этих явлениях сохраняется энергия. Джоуль сформулировал свою мысль так: «В природе не происходит уничтожения силы, производящей работу, без соответствующего действия».

Первая работа Джоуля докладывалась им 24 января 1843 г., а 21 августа того же года Джоуль доложил свои результаты по установлению общей меры тепла и работы. Нагревание 1 кг воды на 1 градус оказалось равноценным подъему 1 кг на 460 м.

В последующие годы Джоуль и ряд других исследователей затрачивают много труда для того, чтобы уточнить значение теплового эквивалента, а также стремятся доказать полную универсальность эквивалента. К концу сороковых годов становится ясно, что, каким бы способом ни переходила работа в тепло, всегда количество возникающей теплоты будет пропорционально количеству затраченной работы. Несмотря на то, что Джоуль опытно обосновал закон сохранения энергии, он не дал в своих работах отчетливой формулировки этого закона.

Эта заслуга принадлежит немецкому физику Гельмгольцу. 23 июля 1847 г. на заседании берлинского физического общества Герман Гельмгольц прочитал доклад о принципе сохранения энергии. В этой работе была впервые отчетливо изложена механическая основа закона сохранения энергии. Мир состоит из атомов, атомы обладают потенциальной и кинетической энергией. Сумма потенциальных и кинетических энергий частиц, из которых построено тело или система, не может



ГЕРМАН ГЕЛЬМГОЛЬЦ (1821—1894) — знаменитый немецкий ученый. Гельмгольц с большим успехом работал в области физики, математики и физиологии. Он впервые (1847 г.) дал математическую трактовку закона сохранения энергии, подчеркнув всеобщий характер этого закона. Выдающиеся результаты принадлежат Гельмгольцу в термодинамике; он впервые применил ее к изучению химических процессов. Своими работами по вихревому движению жидкостей Гельмгольц заложил основы гидродинамики и аэродинамики. Ряд ценных исследований проведен им в области акустики и электромагнетизма. Гельмгольц развил физическую теорию музыки. В своих физических исследованиях применял мощные и оригинальные математические методы.

измениться, если это тело или система не подвержены внешним воздействиям. Закон сохранения энергии, как мы его обрисовали несколькими страницами выше, был впервые сформулирован Гельмгольцем.

После работы Гельмгольца на долю других физиков осталась лишь проверка и приложение принципа сохранения энергии. Успех всех этих исследований привел к тому, что к концу пятидесятых годов закон сохранения энергии был уже общепризван как фундаментальный закон естествознания.

Уже в XX в. наблюдались явления, ставившие под сомнение закон сохранения энергии. Однако в дальнейшем видимые расхождения нашли свое объяснение. Закон сохранения энергии до сих пор всегда с честью выходил из испытаний.

Глава 2

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

ВНУТРИМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СВЯЗИ

Молекулы состоят из атомов. Атомы связаны в молекулы силами, которые называют химическими силами.

Существуют молекулы, состоящие из двух, трех, четырех атомов. Крупнейшие молекулы — молекулы белков — состоят из десятков и даже сотен тысяч атомов.

Царство молекул исключительно разнообразно. Уже сейчас химики выделили из природных веществ и создали в лабораториях миллионы веществ, построенных из различных молекул.

Свойства молекул определяются не только тем, сколько атомов того или иного сорта участвует в их постройке, но и тем, в каком порядке и в какой конфигурации они соединены. Молекула — это не груда кирпичей, а сложная архитектурная постройка, где каждый кирпич имеет свое место и своих вполне определенных соседей. Атомная постройка, образующая молекулу, может быть в большей или меньшей степени жесткой. Во всяком случае, каждый из атомов совершает колебания около своего положения равновесия. В некоторых же случаях одни части молекулы могут вращаться по отношению к другим частям, придавая свободной молекуле в процессе ее теплового движения различные и самые причудливые конфигурации.

Разберем подробнее взаимодействие атомов. На рис. 2.1 изображена кривая потенциальной энергии двухатомной молекулы. Она имеет характерный вид — сначала идет вниз, затем загибается, образуя «яму», и

потом более медленно приближается к горизонтальной оси, по которой отложено расстояние между атомами.

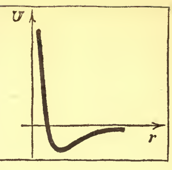


Рис. 2.1.

Мы знаем, что устойчиво состояние, в котором потенциальная энергия имеет наименьшее значение. Когда атом входит в состав молекулы, он «сидит» в потенциальной яме, совершая небольшие тепловые колебания около положения равновесия.

Расстояние от вертикальной оси до дна ямы можно назвать равновесным. На этом расстоянии расположились бы атомы, если бы прекратилось тепловое движение.

Кривая потенциальной энергии рассказывает о всех деталях взаимодействия между атомами. Притягиваются или отталкиваются частицы на том или ином расстоянии, возрастает или убывает сила взаимодействия при отдалении или сближении частиц — все эти сведения можно получить из анализа кривой потенциальной энергии. Точки левее «дна» соответствуют отталкиванию. Напротив, участки кривой правее дна ямы характеризуют притяжение. Важные сведения сообщает и крутизна кривой: чем круче идет кривая, тем больше сила.

Находясь на больших расстояниях, атомы притягиваются один к другому; эта сила весьма быстро уменьшается с увеличением расстояния между ними. При сближении сила притяжения возрастает и достигает наибольшего значения уже тогда, когда атомы подойдут один к другому очень близко. При еще большем сближении притяжение ослабевает и, наконец, на равновесном расстоянии сила взаимодействия обращается в нуль. При сближении атомов на расстояние, меньшее равновесного, возникают силы отталкивания, которые очень резко нарастают и быстро делают практически невозможным дальнейшее уменьшение расстояния между атомами.

Равновесные расстояния (ниже мы будем говорить короче — расстояния) между атомами различны для разных сортов атомов.

Для разных пар атомов различны не только расстояния от вертикальной оси до дна ямы, но и глубина ям.

Глубина ямы имеет простой смысл — чтобы выкатиться из ямы, нужна энергия, как раз равная глубине. Поэтому глубину ямы можно назвать энергией связи частиц.

Расстояния между атомами молекул столь малы, что для их измерения надо выбрать подходящие единицы, иначе пришлось бы выражать их значения, например, в таком виде: 0,000000012 см. Это цифра для молекулы кислорода.

Единицы, особенно удобные для описания атомного мира, называются ангстремами (правда, фамилия шведского ученого, именем которого названы эти единицы, правильно читается Онгстрем; для напоминания об этом над буквой А ставят кружок):

$$1\text{Å}=10^{-8}\ \text{см},$$

т. е. одной стомиллионной доле сантиметра.

Расстояния между атомами молекул лежат в пределах от 1 до 4 Å. Написанное выше равновесное расстояние для кислорода равно 1,2 Å.

Межатомные расстояния, как вы видите, очень малы. Если опоясать земной шар веревкой у экватора, то длина «пояса» во столько же раз будет больше ширины вашей ладони, во сколько раз ширина ладони больше расстояния между атомами молекулы.

Для измерения энергии связи пользуются обычно калориями, но относят их не к одной молекуле, что дало бы, разумеется, ничтожную цифру, а к одному молю, т. е. к числу граммов, равному относительной молекулярной массе.

Ясно, что энергия связи на один моль, если ее поделить на число Авогадро $N_A=6{,}023\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$, даст энергию связи одной молекулы.

Энергия связи атомов в молекуле, как и межатомные расстояния, колеблется в незначительных пределах.

Для того же кислорода энергия связи равна 116 000 кал/моль, для водорода — 103 000 кал/моль и т. д.

Мы уже говорили, что атомы в молекулах располагаются вполне определенным образом одни по отношению к другим, образуя в сложных случаях весьма замысловатые постройки.

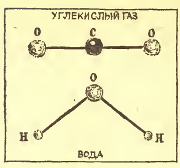


Рис. 2.2.

Приведем несколько простых примеров. В молекуле CO_2 (углекислый газ) все три атома расположены в ряд — атом углерода посередине. Молекула воды H_2O имеет уголковую форму, вершиной угла (он равен 105°) является атом кислорода.

В молекуле аммиака NH_3 атом азота находится в вершине трехгранной пирамиды; в молекуле метана CH_4 атом углерода находится в центре четырехгранной фигуры с равными сторонами, которая называется тетраэдром.

Атомы углерода бензола C_6H_6 образуют правильный шестиугольник. Связи атомов углерода с водородом идут от всех вершин шестиугольника. Все атомы расположены в одной плоскости.

Схемы расположения центров атомов этих молекул показаны на рис. 2.2 и 2.3. Линии символизируют связи.

Прошла химическая реакция; были молекулы одного сорта, образовались другие. Одни связи порваны, другие созданы вновь. Для разрыва связей между атомами — вспомните рисунок — нужно затратить такую же работу, как при выкатывании шара из ямы. Напротив, при образовании

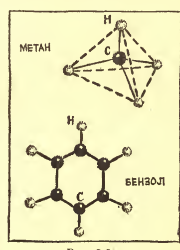


Рис. 2.3.

новых связей энергия выделяется — шар скатывается в яму.

Что больше, работа разрыва или работа созидания? В природе мы сталкиваемся с реакциями обоих типов.

Излишек энергии называется тепловым эффектом, или короче — теплотой превращения (реакции). Тепловые эффекты реакций — это большей частью величины порядка десятков тысяч калорий при расчете на моль. Очень часто тепловой эффект включают в качестве слагаемого в формулу реакции.

Например, реакция сгорания углерода в виде графита, т. е. соединения его с кислородом, пишется так:

$$C+O_2=CO_2+94\,250 \text{ кал.}$$

Это значит, что при соединении углерода с кислородом выделяется энергия 94 250 калорий.

Сумма внутренних энергий моля углерода и моля кислорода в графите равняется внутренней энергии моля углекислого газа плюс 94 250 калорий.

Таким образом, подобные записи имеют ясный смысл алгебраических равенств, записанных для величин внутренней энергии.

С помощью таких уравнений можно найти тепловые эффекты превращений, для которых не годятся по тем или иным причинам прямые способы измерения. Вот пример: если бы углерод (графит) соединить с водородом, то образовался бы газ ацетилен:

$$2C+H_2=C_2H_2.$$

Реакция не идет таким путем. Тем не менее можно найти ее тепловой эффект. Запишем три известные реакции —

окисление углерода:

$$2C+2O_2=2CO_2+188\,000 \text{ кал},$$

окисление водорода:

$$H_2+\frac{1}{2}O_2=H_2O+68\,000 \text{ кал},$$

окисление ацетилена:

$$C_2H_2+\frac{5}{2}O_2=2CO_2+H_2O+312\,000 \text{ кал.}$$

Все эти равенства можно рассматривать как уравнения для энергий связи молекул. Если так, то ими можно оперировать как алгебрическими равенствами. Вычитая из нижнего два верхних, получим

$$2C+H_2=C_2H_2 - 56\,000 \text{ кал.}$$

Значит, интересующее нас превращение сопровождается поглощением 56 000 калорий на один моль.

ФИЗИЧЕСКАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ МОЛЕКУЛЫ

До того как исследователи получили детальное представление о структуре вещества, такого различия не делалось. Молекула есть молекула, т. е. мельчайший представитель вещества. Казалось бы, этим все сказано. Однако дело обстоит не так.

Те молекулы, о которых мы сейчас рассказали, являются молекулами в обоих смыслах слова. Молекулы углекислого газа, аммиака, бензола, о которых мы говорили, и молекулы практически всех органических веществ (о которых мы не говорили) состоят из атомов, которые сильно связаны друг с другом. При растворении, плавлении, испарении эти связи не разрываются. Молекула продолжает себя вести как отдельная частичка, как маленькое физическое тело при любых физических воздействиях и изменениях состояния.

Но так обстоит дело далеко не всегда. Для большинства неорганических веществ о молекуле можно говорить лишь в химическом смысле этого слова. А вот мельчайшей частички таких общеизвестных неорганических веществ, как поваренная соль или кальцит, или сода, не существует. Мы не находим отдельных частичек в кристаллах (об этом будет рассказано через несколько страниц); при растворении молекулы распадаются на части.

Сахар — органическое вещество. Поэтому в воде сладкого чая «плавают» молекулы сахара. А вот в соленой воде никаких молекул поваренной соли (хлористого натрия) мы не найдем. Эти «молекулы» (приходится ставить кавычки) существуют в воде в виде атомов (а точнее, ионов — электрически заряженных атомов, — о них речь впереди).

Так же точно и в парах, и в расплавах части молекул живут самостоятельной жизнью.

Когда речь идет о силах, связывающих атомы в физическую молекулу, то такие силы называют валентными. Межмолекулярные силы являются невалентными. Однако тип кривой взаимодействия, который был показан на рис. 2.1, одинаков в обоих случаях. Различие лишь в глубине ямы. В случае валентных сил яма в сотни раз глубже.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ

Молекулы взаимно притягиваются, в этом невозможно сомневаться. Если бы в какое-то мгновение они перестали притягиваться друг к другу, все жидкие и твердые тела распались бы на молекулы.

Молекулы взаимно отталкиваются, и это несомненно, так как иначе жидкости и твердые тела сжимались бы с необыкновенной легкостью.

Между молекулами действуют силы, во многом похожие на силы между атомами, о которых говорилось выше. Кривая потенциальной энергии, которую мы только что рисовали для атомов, правильно передает основные черты взаимодействия молекул. Однако между этими взаимодействиями имеются и существенные различия.

Сравним, например, равновесное расстояние между атомами кислорода, образующими молекулу, и атомами кислорода двух соседних молекул, притянувшихся в затвердевшем кислороде до равновесного положения. Различие будет очень заметным: атомы кислорода, образующие молекулу, устанавливаются на расстоянии 1,2 Å, атомы кислорода разных молекул подходят друг к другу на 2,9 Å.

Подобные результаты получаются и для других атомов. Атомы чужих молекул устанавливаются дальше один от другого, чем атомы одной молекулы. Поэтому молекулы легче оторвать одну от другой, чем атомы от молекулы, причем различия в энергиях много больше разницы в расстояниях. Если энергия, необходимая для разрыва связи между атомами кислорода, образующими молекулу, составляет около 100 ккал/моль, то

энергия на растаскивание молекул кислорода меньше 2 ккал/моль.

Значит, на кривой потенциальной энергии молекул «яма» лежит дальше от вертикальной оси и, кроме того, «яма» гораздо менее глубока.

Однако этим не исчерпывается различие взаимодействия атомов, образующих молекулу, и взаимодействия молекул.

Химики показали, что атомы сцепляются в молекулу с вполне определенным числом других атомов. Если два атома водорода образовали молекулу, то третий атом уже не присоединится к ним для этой цели. Атом кислорода в воде соединен с двумя атомами водорода и присоединить к ним еще один невозможно.

Ничего подобного мы не находим в межмолекулярном взаимодействии. Притянув к себе одного соседа, молекула ни в какой степени не теряет своей «притягательной силы». Подход соседей будет происходить до тех пор, пока хватит места.

Что значит «хватит места»? Разве молекулы — это что-то вроде яблок или яиц? Конечно, в некотором смысле такое сравнение оправдано: молекулы — физические тела, обладающие определенными «размерами» и «формой». Равновесное расстояние между молекулами и есть не что иное, как «размеры» молекул.

КАК ВЫГЛЯДИТ ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ?

Взаимодействие между молекулами может иметь большее или меньшее значение в «жизни» молекул.

Три состояния вещества — газообразное, жидкое и твердое — различаются одно от другого той ролью, которую в них играет взаимодействие молекул.

Слово «газ» придумано учеными. Оно произведено от греческого слова «хаос» — беспорядок.

И действительно, газообразное состояние вещества является примером существующего в природе полного, совершенного беспорядка во взаимном расположении и движении частиц. Нет такого микроскопа, который позволил бы увидеть движение газовых молекул, но, несмотря на это, физики могут достаточно детально описать жизнь этого невидимого мира.

В кубическом сантиметре воздуха при нормальных условиях (комнатная температура и атмосферное давление) находится огромное число молекул, примерно $2{,}5 \cdot 10^{19}$ (т. е. 25 миллиардов миллиардов молекул). На каждую молекулу приходится объем $4 \cdot 10^{-20}$ см³, т. е. кубик со стороной примерно $3{,}5 \cdot 10^{-7}$ см $= 35$ Å. Однако молекулы очень малы. Например, молекулы кислорода и азота — основная часть воздуха — имеют средний размер около 4 Å.

Таким образом, среднее расстояние между молекулами в 10 раз больше размера молекулы. А это в свою очередь означает, что средний объем воздуха, на который приходится одна молекула, примерно в 1000 раз больше объема самой молекулы.

Представьте себе ровную площадку, на которой беспорядочно разбросаны монетки, причем на площадь в 1 м² приходится в среднем сто монеток. Это значит одна-две монетки на страницу книги, которую вы читаете. Приблизительно так же редко расположены газовые молекулы.

Каждая молекула газа находится в состоянии непрерывного теплового движения.

Проследим за одной молекулой. Вот она стремительно движется куда-то вправо. Если бы на ее пути не встретилось препятствий, то молекула с той же скоростью продолжала бы свое движение по прямой линии. Но путь молекулы пересекают ее бесчисленные соседи. Столкновения неминуемы, и молекулы разлетаются, как два столкнувшихся биллиардных шара. В какую сторону отскочит наша молекула? Приобретет или потеряет она свою скорость? Все возможно: ведь встречи могут быть самые различные. Удары возможны и спереди и сзади, и справа и слева, и сильные и слабые. Ясно, что, подвергаясь таким беспорядочным соударениям при этих случайных встречах, молекула, за которой мы наблюдаем, будет метаться во все стороны по сосуду, в котором заключен газ.

Какой путь удается молекулам газа пробежать без столкновения?

Он зависит от размеров молекул и от плотности газа. Чем больше размеры молекул и число их в сосуде, тем чаще они будут сталкиваться. Средняя длина пути, пробегаемого молекулой без соударения,— она

называется средней длиной пробега — равна при обычных условиях $11 \cdot 10^{-6}$ см $= 1100$ Å для молекул водорода и $5 \cdot 10^{-6}$ см $= 500$ Å для молекул кислорода. $5 \cdot 10^{-6}$ см — двадцатитысячная доля миллиметра, расстояние очень малое, но по сравнению с размерами молекул оно далеко не мало. Пробегу $5 \cdot 10^{-6}$ см для молекулы кислорода соответствует в масштабе у биллиардного шара расстояние в 10 м.

Строение жидкости существенно отличается от строения газа, молекулы которого находятся далеко одна от другой и лишь изредка сталкиваются. В жидкости молекулы постоянно находятся в непосредственной близости. Молекулы жидкости расположены, как картофелины в мешке. Правда, с одним отличием — молекулы жидкости находятся в состоянии непрерывного хаотического теплового движения. Из-за большой тесноты они не могут передвигаться так свободно, как молекулы газа. Каждая «топчется» все время почти на одном и том же месте в окружении одних и тех же соседей и только понемногу перемещается по объему, занятому жидкостью. Чем более вязкая жидкость, тем это перемещение медленней. Но даже в такой «подвижной» жидкости, как вода, молекула сместится на 3 Å за то время, которое нужно газовой молекуле для пробега в 700 Å.

Совсем решительно расправляются силы взаимодействия между молекулами с их тепловым движением в твердых телах. В твердом веществе молекулы практически все время находятся в неизменном положении. Тепловое движение сказывается только в том, что молекулы непрерывно колеблются около положений равновесия. Отсутствие систематических перемещений молекул и есть причина того, что мы называем твердостью. Действительно, если молекулы не меняют соседей, то тем более остаются в неизменной связи одна с другой отдельные части тела.

СЖИМАЕМОСТЬ ТЕЛ

Как дождевые капли барабанят по крыше, так бьются о стенки сосуда молекулы газа. Число этих ударов огромно и действие их, сливаясь воедино, и

создает то давление, которое может двигать поршень двигателя, разорвать снаряд или надуть воздушный шар. Град молекулярных ударов — это атмосферное давление, это давление, заставляющее прыгать крышку кипящего чайника, это сила, выбрасывающая пулю из винтовки.

С чем же связано давление газа? Ясно, что давление будет тем больше, чем сильнее удар, наносимый одной молекулой. Не менее очевидно, что давление будет зависеть от числа ударов, наносимых в секунду. Чем больше молекул в сосуде, тем чаще удары, тем больше давление. Значит, прежде всего давление p данного газа пропорционально его плотности.

Если масса газа неизменна, то, уменьшая объем, мы в соответствующее число раз увеличиваем плотность. Значит, давление газа в таком закрытом сосуде будет обратно пропорционально объему. Или, иными словами, произведение давления на объем должно быть неизменным:

$$pV = \text{const}.$$

Этот простой закон был открыт английским физиком Бойлем и французским ученым Мариоттом. Закон Бойля и Мариотта — один из первых количественных законов в истории физической науки. Разумеется, он имеет место при неизменной температуре.

По мере сжатия газа уравнение Бойля — Мариотта выполняется все хуже. Молекулы приближаются, взаимодействие между ними начинает сказываться на поведении газа.

Закон Бойля и Мариотта справедлив в тех случаях, когда вмешательство сил взаимодействия в жизнь молекул газа совершенно незаметно. Поэтому о законе Бойля — Мариотта говорят как о законе идеальных газов.

Прилагательное «идеальный» звучит несколько забавно по отношению к слову «газ». Идеальный — это значит совершенный, такой, что лучше быть не может.

Чем проще модель или схема, тем идеальнее она для физика. Упрощаются расчеты, легкими и ясными становятся объяснения физических явлений. Термин «идеальный газ» относится к простейшей схеме газа.

Поведение достаточно разреженных газов практически неотличимо от поведения идеальных газов.

Сжимаемость жидкостей гораздо меньше, чем сжимаемость газов. В жидкости молекулы уже находятся в «соприкосновении». Сжатие состоит лишь в улучшении «упаковки» молекул, а при очень больших давлениях — в спрессовке самой молекулы. Насколько силы отталкивания затрудняют сжатие жидкости, видно из следующих цифр. Повышение давления от одной до двух атмосфер влечет за собой уменьшение объема газа вдвое, в то время как объем воды изменяется на 1/20 000, а ртути — всего на 1/250 000.

Даже огромное давление на глубинах океана неспособно сколько-нибудь заметно сжать воду. Действительно, давление в одну атмосферу создается столбом воды в десять метров. Давление под слоем воды в 10 км равно 1000 атмосфер. Объем воды уменьшается на 1000/20 000, т. е. на 1/20.

Сжимаемость твердых тел мало отличается от сжимаемости жидкости. Это и понятно — в обоих случаях молекулы уже соприкасаются, и сжатие может быть достигнуто лишь за счет дальнейшего сближения уже сильно отталкивающихся молекул. Сверхвысокими давлениями в 50—100 тысяч атмосфер удается сжать сталь на 1/1000, свинец — на 1/7 долю объема.

Из этих примеров видно, что в земных условиях не удается сколько-нибудь значительно сжать твердое вещество.

Но во Вселенной есть тела, где вещество сжато несравненно сильнее. Астрономы открыли существование звезд, плотность вещества в которых доходит до 10^6 г/см^3. Внутри этих звезд — их называют белыми карликами («белые» — по характеру светимости, «карлики» — из-за относительно малых размеров) — должно поэтому иметь место огромное давление.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СИЛЫ

Можно ли выйти сухим из воды? Конечно, для этого нужно смазаться несмачивающимся водой веществом.

Натрите палец парафином и опустите в воду. Когда вы его вынете, окажется, что воды на пальце нет, если

не считать двух-трех капелек. Небольшое движение — и капельки стряхиваются.

В этом случае говорят: вода не смачивает парафин. Ртуть ведет себя таким образом по отношению почти ко всем твердым телам: ртуть не смачивает кожу, стекло, дерево...

Вода более капризна. Она тесно льнет к одним телам и старается не соприкасаться с другими. Вода не смачивает жирные поверхности, но хорошо смачивает чистое стекло. Вода смачивает дерево, бумагу, шерсть.

Если капельку воды нанести на чистое стекло, то она растечется и образует очень тонкую лужицу. Если такую же капельку опустить на парафин, то она так и останется капелькой почти сферической формы, чуть придавленной силой тяжести.

К веществам, «пристающим» почти ко всем телам, относится керосин. Стремясь растечься по стеклу или металлу, керосин способен выползать из плохо закрытого сосуда. Лужица пролитого керосина может на долгое время отравить существование: керосин захватит большую поверхность, заползет в щели, проникнет в одежду. Поэтому так трудно избавиться от его малоприятного запаха.

Несмачивание тел может привести к любопытным явлениям. Возьмите иголку, смажьте ее жиром и аккуратно положите плашмя на воду. Иголка не утонет. Внимательно всматриваясь, можно заметить, что иголка продавливает воду и спокойно лежит в образовавшейся ложбинке. Однако достаточно легкого нажатия, и иголка пойдет ко дну. Для этого нужно, чтобы значительная ее часть оказалась в воде.

Это интересное свойство используется насекомыми, быстро бегающими по воде, не замочив лапок.

Смачивание используется при флотационном обогащении руд. Слово «флотация» значит «всплывание». Сущность явления состоит в следующем. Тонко измельченную руду загружают в чан с водой, туда добавляют небольшое количество специального масла, которое должно обладать свойством смачивать крупинки полезного ископаемого и не смачивать крупинки «пустой породы» (так называют ненужную часть руды). При перемешивании крупинки полезного ископаемого обволакиваются маслянистой пленкой.

В черную кашу из руды, воды и масла вдувается воздух. Образуется множество мелких пузырьков воздуха — пена. Пузырьки воздуха всплывают. Процесс флотации основан на том, что обвернутые маслом крупинки цепляются за воздушные пузырьки. Крупный пузырек выносит крупинку вверх, как воздушный шар.

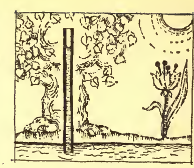


Рис. 2.4.

Полезное ископаемое переходит в пену на поверхность. Пустая порода остается на дне. Пену снимают и направляют в дальнейшую обработку для получения так называемого «концентрата», который содержит в десятки раз меньшую долю пустой породы.

Силы сцепления поверхностей способны нарушить уравнивание жидкости в сообщающихся сосудах. Справедливость этого очень легко проверить.

Если тоненькую (доля миллиметра в диаметре) стеклянную трубочку опустить в воду, то в нарушение закона сообщающихся сосудов вода в ней быстро начнет подниматься вверх, и уровень ее установится существенно выше, чем в широком сосуде (рис. 2.4).

Что же произошло? Какие силы удерживают вес поднявшегося столба жидкости? Подъем произведен силами сцепления воды со стеклом.

Силы поверхностного сцепления отчетливо проявляются лишь тогда, когда жидкость поднимается в достаточно тонких трубках. Чем у́же трубочка, тем выше поднимается жидкость, тем отчетливее явление. Название этих поверхностных явлений связано с названием трубочек. Канал в такой трубке имеет диаметр, измеряющийся долями миллиметра; такую трубку называют капиллярной (что значит в переводе: «тонкой, как волос»). Явление подъема жидкости в тонких трубках называется капиллярностью.

На какую же высоту способны поднять жидкость капиллярные трубки? Оказывается, в трубке диаметра



Рис. 2.5.

1 мм вода поднимается на высоту 1,5 мм. При диаметре 0,01 мм высота подъема возрастает во столько же раз, во сколько уменьшился диаметр трубки, т. е. до 15 см.

Разумеется, подъем жидкости возможен лишь при условии смачивания. Нетрудно догадаться, что ртуть не будет подниматься в стеклянных трубках. Наоборот, ртуть в стеклянных трубках опускается. Ртуть так не «терпит» соприкосновения со стеклом, что стремится сократить общую поверхность до того минимума, который разрешает сила тяжести.

Существует множество тел, которые представляют собой нечто вроде системы тончайших трубок. В таких телах всегда наблюдаются капиллярные явления.

Целая система длинных каналов и пор имеется у растений и деревьев. Диаметры этих каналов меньше сотых долей миллиметра. Благодаря этому капиллярные силы поднимают почвенную влагу на значительную высоту и разносят воду по телу растения.

Очень удобная вещь — промокательная бумага. Вы сделали кляксу, а надо перевернуть страницу. Не ждать ведь, пока клякса высохнет! Берется листик промокательной бумаги, конец его погружается в каплю, и чернила быстро бегут кверху против силы тяжести.

Происходит типичное капиллярное явление. Если рассмотреть промокательную бумагу в микроскоп, то можно увидеть ее структуру. Такая бумага состоит из неплотной сетки бумажных волокон, образующих друг с другом тонкие и длинные каналы. Эти каналы и играют роль капиллярных трубочек.

Такая же система длинных пор или каналов, образованных волокнами, имеется в фитилях. По фитилю поднимается кверху керосин в лампах. С помощью фитиля можно создать и сифон, опустив фитиль одним концом в неполный стакан жидкости так, чтобы другой

конец, перевешивающийся через борт, был ниже первого (рис. 2.5).

В технологии красильного производства тоже часто используют способность тканей затягивать в себя жидкость тонкими каналами, образованными нитями ткани.

Но мы еще ничего не сказали о молекулярном механизме этих интересных явлений.

Различия в поверхностных силах превосходно объясняются межмолекулярными взаимодействиями.

Капля ртути не растекается по стеклу. Это происходит по той причине, что энергия взаимодействия атомов ртути между собой больше энергии связи атомов стекла и ртути. По этой же причине ртуть не поднимается в узких капиллярах.

С водой дело обстоит иначе. Оказывается, что атомы водорода молекул воды охотно цепляются за атомы кислорода кремния, из которой в основном состоит стекло. Межмолекулярные силы вода — стекло больше межмолекулярных сил вода — вода. Поэтому вода растекается по стеклу и поднимается в стеклянных капиллярах.

Поверхностные силы, вернее энергию связи (глубина ямы на рис. 2.1), для разных пар веществ можно и измерить, и вычислить. Разговор о том, как это делается, завел бы нас слишком далеко.

КРИСТАЛЛЫ И ИХ ФОРМА

Многие думают, что кристаллы — это красивые, редко встречающиеся камни. Они бывают разных цветов, обычно прозрачные и, что самое замечательное, обладают красивой правильной формой. Чаще всего кристаллы представляют собой многогранники, стороны (грани) их идеально плоские, ребра строго прямые. Они радуют глаз чудесной игрой света в гранях, удивительной правильностью строения.

Есть среди них скромные кристаллы каменной соли природного хлористого натрия, т. е. обычной поваренной соли. Они встречаются в природе в виде прямоугольных параллелепипедов или кубиков. Простая форма и у кристаллов кальцита — прозрачных косоугольных параллелепипедов. Куда сложнее кристаллы

кварца. У каждого кристаллика множество граней разной формы, пересекающихся по ребрам разной длины.

Однако кристаллы — совсем не музейная редкость. Кристаллы окружают нас повсюду. Твердые тела, из которых мы строим дома и делаем станки, вещества, которые мы употребляем в быту,— почти все они относятся к кристаллам. Почему же мы этого не видим? Дело в том, что в природе редко попадаются тела в виде отдельных одиночных кристаллов (или, как говорят, монокристаллов). Чаще всего вещество встречается в виде прочно сцепившихся кристаллических зернышек уже совсем малого размера — меньше тысячной доли миллиметра. Такую структуру можно увидеть лишь в микроскоп.

Тела, состоящие из кристаллических зернышек, называются мелкокристаллическими, или поликристаллическими («поли» — по-гречески «много»).

Конечно, к кристаллам надо отнести и мелкокристаллические тела. Тогда окажется, что почти все окружающие нас твердые тела — кристаллы. Песок и гранит, медь и железо, салол, продающийся в аптеке, и краски — все это кристаллы.

Есть и исключения; стекло и пластмассы не состоят из кристалликов. Такие твердые тела называются аморфными.

Итак, изучать кристаллы — это значит изучать почти все окружающие нас тела. Понятно, как это важно.

Одиночные кристаллы сразу же узнают по правильности форм. Плоские грани и прямые ребра являются характерным свойством кристалла; правильность формы несомненно связана с правильностью внутреннего строения кристалла. Если кристалл в каком-то направлении особо вытянулся, значит, и строение кристалла в этом направлении какое-то особенное.

Но представьте себе, что из крупного кристалла на станке изготовлен шар. Удастся ли сообразить, что в руках у нас кристалл, и отличить этот шар от стеклянного? Поскольку разные грани кристалла развиты в различной степени, то это наводит на мысль о том, что и физические свойства кристалла неодинаковы в разных направлениях. Сказанное относится к прочно-

сти, электропроводности, да и вообще ко многим свойствам. Эта особенность кристалла называется анизотропией его свойств. Анизотропный — это значит разный в разных направлениях.

Кристаллы анизотропны. Напротив, аморфные тела, жидкости и газы изотропны («изо» — по-гречески «одинаково», «тропос» направление), т. е. обладают одинаковыми свойствами в разных направлениях. Анизотропия свойств и позволяет узнать, является ли прозрачный бесформенный кусочек вещества кристаллом или нет.

Отправимся в минералогический музей и внимательно рассмотрим разные монокристаллические образцы кристаллов одного и того же вещества. Вполне возможно, что на стенде будут выставлены образцы и правильной и неправильной формы. Некоторые кристаллы будут выглядеть, как обломки, другие будут иметь 1—2 грани «ненормального» развития.

Отберем из общей кучи образцы, которые покажутся нам идеальными и зарисуем их. Картинка, которая получится, показана на рис. 2.6. В качестве примера выбран все тот же кварц. У кварца, как и у других кристаллов, может развиться разное число граней одного «сорта», также разное число самих «сортов» граней. Пусть внешнее сходство не бросается в глаза, все же такие кристаллики похожи друг на друга, как близкие родственники, как близнецы. В чем же заключается их сходство?



Рис. 2.6.

Посмотрите на рис. 2.6, где изображен ряд кристаллов кварца. Все эти кристаллики — близкие «родственники». Их можно сделать и совсем одинаковыми, сошлифовывая грани на различную глубину параллельно самим себе. Легко видеть, что таким способом, например,

кристалл *II* может быть сделан совершенно таким же, как кристалл *I*. Это возможно потому, что углы между сходственными гранями образцов одинаковы, например, между гранями *А* и *Б*, *Б* и *В* и т. д.

В этом равенстве углов и заключается «семейное» сходство кристаллов. При сошлифовывании граней параллельно самим себе форма кристалла изменяется, но углы между гранями сохраняют свое значение.

При росте кристалла в зависимости от ряда случайностей одни грани могут попасть в условия более благоприятные, другие в менее удобные для увеличения своих размеров. Внешнее сходство выросших в разных условиях образцов станет незаметным, но углы между сходственными гранями всех кристаллов изучаемого вещества будут всегда одинаковы. Форма кристалла случайна, а углы между гранями отвечают (вы дальше поймете, почему) его внутренней природе.

Но плоскогранность не является единственным свойством кристаллов, которое отличает их от бесформенных тел. Кристаллы обладают симметрией. Смысл этого слова лучше всего мы поймем на примерах.

На рис. 2.7 изображена скульптура; перед ней стоит большое зеркало. В зеркале возникает отражение, в точности повторяющее предмет. Скульптор может изготовить две фигуры и расположить их так же, как фигуру и ее отражение в зеркале. Эта «двойная» скульптура будет симметричной фигурой — она состоит из двух зеркально равных частей.

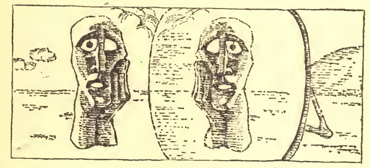


Рис. 2.7.

Действительно, представим себе, что так же, как и на рис. 2.7, расположено плоское зеркало. Тогда правая часть скульптуры в точности совпадет с отражением левой ее части. Такая симметричная фигура обладала бы вертикальной плоскостью зеркальной симметрии, которая проходила бы посередине между ними. Плоскость симметрии — мысленная плоскость, но мы ее отчетливо ощущаем, рассматривая симметрично построенное тело.

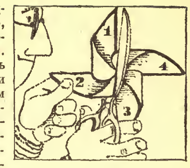


Рис. 2.8.

Плоскостью симметрии обладают тела животных, вертикальную плоскость внешней симметрии можно провести через человека. В животном мире симметрия осуществляется лишь приблизительно, да и вообще идеальной симметрии в жизни не существует. Архитектор может изобразить на чертеже дом, состоящий из двух идеально симметричных половин. Но когда дом будет построен, как бы хорошо его ни делали, всегда можно найти разницу в двух соответствующих частях здания, скажем, в одном месте есть трещинка, а в другом — нет.

Наиболее точная симметрия осуществляется в мире кристаллов, но и здесь она неидеальная: невидимые глазом трещинки, царапины всегда делают равные грани слегка отличными друг от друга.

На рис. 2.8 изображена детская бумажная вертушка. Она тоже симметрична, но плоскость симметрии через нее провести нельзя. В чем же тогда заключается симметрия этой фигурки? Прежде всего спросим себя о симметричных ее частях. Сколько их? Очевидно, четыре. В чем заключается правильность взаимного расположения этих одинаковых частей? Это также нетрудно заметить. Повернем вертушку на прямой угол против часовой стрелки, т. е. на 1/4 окружности: тогда крыло *1* встанет на то место, где было крыло *2*, крыло *2* — на место *3*, *3* — на место *4* и *4* — на место *1*. Новое положение неотличимо от предыдущего. Про такую фигурку

мы скажем так: она обладает осью симметрии, говоря точнее, осью симметрии 4-го порядка, так как совмещение происходит при повороте на 1/4 окружности.

Итак, ось симметрии — это такая прямая линия, поворотом около которой на долю оборота можно перевести тело в положение, не отличимое от исходного. Порядок оси (в нашем случае 4-й) указывает, что такое совмещение происходит при повороте на 1/4 окружности. Следовательно, четырьмя последовательными поворотами мы возращаемся в исходное положение.

Встречаемся ли мы с симметрией любого типа в царстве кристаллов? Опыт показывает, что нет.

В кристаллах мы встречаемся лишь с осями симметрии 2-, 3-, 4- и 6-го порядков. И это не случайно. Кристаллографы доказали, что это связано с внутренним строением кристалла. Поэтому число различных видов или, как говорят, классов симметрии кристаллов относительно невелико — оно равно 32.

СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Почему так красива, правильна форма кристалла? Грани его, блестящие и ровные, выглядят так, как будто бы над кристаллом поработал искусный шлифовальщик. Отдельные части кристалла повторяют друг друга, образуя красивую симметричную фигуру. Эта исключительная правильность кристаллов была знакома уже людям древности. Но представления древних ученых о кристаллах мало отличались от сказок и легенд, сочиненных поэтами, воображение которых было пленено красотой кристаллов. Верили, что хрусталь образуется из льда, а алмаз — из хрусталя. Кристаллы наделялись множеством таинственных свойств: исцелять от болезней, предохранять от яда, влиять на судьбу человека...

Лишь в XVII—XVIII вв. появились первые научные взгляды на природу кристаллов. Представление о них дает рис. 2.9, заимствованный из книги XVIII в. По мнению ее автора, кристалл построен из мельчайших «кирпичиков», плотно приложенных друг к другу. Эта мысль довольно естественна. Разобьем сильным ударом кристалл кальцита (углекислый кальций). Он

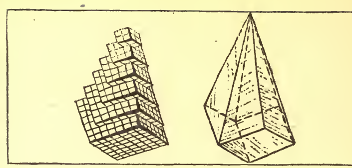


Рис. 2.9.

разлетится на кусочки разной величины. Рассматривая их внимательно, мы обнаружим, что эти куски имеют правильную форму, вполне подобную форме большого кристалла — их родителя. Наверное, рассуждал ученый, и дальнейшее дробление кристалла будет происходить таким же образом, пока мы не дойдем до мельчайшего, невидимого глазом кирпичика, представляющего кристалл данного вещества. Эти кирпичики так малы, что построенные из них ступенчатые «лестницы» — грани кристалла — кажутся нам безукоризненно гладкими. Ну, а дальше, что же представляет собой этот «последний» кирпич? На такой вопрос ученый того времени ответить не мог.

«Кирпичная» теория строения кристалла принесла науке большую пользу. Она объяснила происхождение прямых ребер и граней кристалла: при росте кристалла одни кирпичики подстраиваются к другим, и грань растет подобно стене дома, выкладываемой руками каменщика.

Итак, ответ на вопрос о причине правильности и красоты формы кристаллов был дан уже давно. Причиной этого обстоятельства является внутренняя правильность. А правильность заключается в многократном повторении одних и тех же элементарных частей.

Представьте себе парковую решетку, сделанную из прутьев разной длины и расположенных как попало. Безобразная картина. Хорошая решетка построена из одинаковых прутьев, расположенных в правильной последовательности на одинаковых расстояниях один

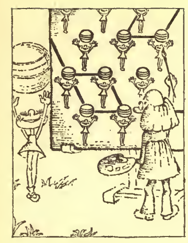


Рис. 2.10.

от другого. Такую же самоповторяющуюся картину мы находим в обоях. Здесь элемент рисунка — скажем, девочка, играющая в мяч,— повторяется уже не в одном направлении, как в парковой решетке, а заполняет плоскость.

Какое же отношение имеют парковая решетка и обои к кристаллу? Самое прямое. Парковая решетка состоит из звеньев, повторяющихся вдоль линии, обои — из картинок, повторяющихся вдоль плоскости, а кристалл — из групп атомов, повторяющихся в пространстве. Поэтому и говорят, что атомы кристалла образуют пространственную (или кристаллическую) решетку.

Нам надо обсудить ряд деталей, относящихся к пространственной решетке, но чтобы не затруднять художника построением сложных объемных рисунков, мы объясним то, что нам надо, на примере куска обоев.

На рис. 2.10 выделен тот наименьший кусок, простым перекладыванием которого можно составить все обои. Чтобы выделить такой кусок, проведем из любой точки рисунка, например из центра мячика, две линии, соединяющие выбранный мячик с двумя соседними. На этих линиях можно построить, как это видно на нашем рисунке, параллелограмм. Перекладывая этот кусочек в направлении основных исходных линий, можно составить весь рисунок обоев. Этот наименьший кусок может быть выбран по-разному: из рисунка видно, что можно выбрать несколько разных параллелограммов, каждый из которых содержит одну фигурку. Подчеркнем, что для нас в данном случае безразлично, будет ли эта фигурка целой внутри выделенного куска или разделенной на части линиями, ограничивающими этот кусок.

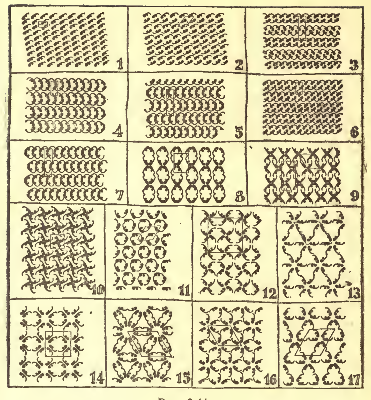


Рис. 2.11.

Было бы неверным полагать, что, изготовив повторяющуюся на обоях фигурку, художник может считать свою задачу оконченной. Это было бы так лишь в том случае, если составление обоев можно было бы провести единственным способом — прикладыванием к данному кусочку, содержащему одну фигурку, другого такого же, параллельно сдвинутого.

Однако кроме этого простейшего способа есть еще шестнадцать способов заполнения обоев закономерно повторяющимся рисунком, т. е. всего существует 17 типов взаимных расположений фигурок на плоскости. Они показаны на рис. 2.11. В качестве повторяющегося рисунка здесь выбрана более простая, но, так же как

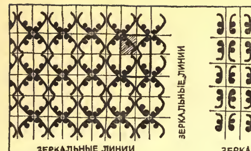


Рис. 2.12.

и на рис. 2.10, лишенная собственной симметрии фигурка. Однако составленные из нее узоры симметричны, и их различие определяется различием симметрии расположения фигурок.

Мы видим, что, например, в первых трех случаях рисунок не обладает зеркальной плоскостью симметрии — нельзя поставить вертикальное зеркало так, чтобы одна часть рисунка была «отражением» другой части. Напротив, в случаях 4 и 5 имеются плоскости симметрии. В случаях 8 и 9 можно «установить» два взаимно перпендикулярных зеркала. В случае 10 имеются оси 4-го порядка, перпендикулярные к чертежу, в случае 11 — оси 3-го порядка. В случаях 13 и 15 имеются оси 6-го порядка и т. д.

Плоскости и оси симметрии наших рисунков выступают не поодиночке, а параллельными «семействами». Если мы нашли одну точку, через которую можно провести ось (или плоскость) симметрии, то найдем быстро и соседнюю и далее на таком же расстоянии третью и четвертую и т. д. точки, через которые проходят такие же оси (или плоскости) симметрии.

17 типов симметрии плоского узора не исчерпывают, конечно, всего разнообразия узоров, составляемых из одной и той же фигурки: художник должен указать еще одно обстоятельство,— как расположить фигурку по отношению к граничным линиям ячейки. На рис. 2.12 показаны два узора обоев с той же исходной фигуркой, по различно расположенной по отношению к зеркалам. Оба эти узора относятся к случаю 8.

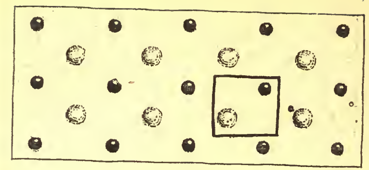


Рис. 2.13.

Каждое тело, в том числе и кристалл, состоит из атомов. Простые вещества состоят из одинаковых атомов, сложные — из атомов двух или нескольких сортов. Предположим, что мы могли бы в сверхмощный микроскоп рассмотреть поверхность кристалла поваренной соли и увидеть центры атомов. Рис. 2.13 показывает, что атомы расположены вдоль грани кристалла, как узор обоев. Теперь вы уже можете легко понять, как построен кристалл. Кристалл представляет собой «пространственные обои». Пространственные, т. е. объемные, а не плоские элементарные ячейки — это «кирпичи», прикладыванием которых друг к другу в пространстве строится кристалл.

Сколько же способов построения «пространственных обоев» из элементарных кусков? Эта сложная математическая задача была решена в конце прошлого века Евграфом Степановичем Федоровым. Он доказал, что должны существовать 230 способов построения кристалла.

Все современные данные о внутреннем строении кристаллов получены при помощи рентгеноструктурного анализа, о котором мы расскажем в книге 4.

Существуют простые кристаллы, построенные из атомов одного сорта. Например, алмаз — это чистый углерод. Кристаллы поваренной соли состоят из ионов двух сортов: натрия и хлора. Более сложные кристаллы могут быть построены из молекул, которые в свою очередь состоят из атомов многих сортов.

Однако в кристалле всегда можно выделить наименьшую повторяющуюся группу атомов (в простейшем

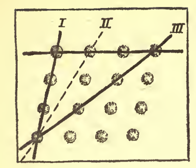


Рис. 2.14.

случае это будет один атом), иными словами, элементарную ячейку.

Размеры ячейки могут быть весьма различными. Наименьшие расстояния между соседними узлами (вершинами ячейки) встречаются у простейших кристаллов, построенных из атомов одного вида, наибольшие — у сложных кристаллов белка. Расстояния колеблются от 2—3 до нескольких сот ангстремов (стомиллионных долей сантиметра).

Кристаллические решетки очень разнообразны. Однако свойства, общие для всех кристаллов, безупречно объясняются решетчатым строением кристаллов. Прежде всего нетрудно понять, что идеально плоские грани — это плоскости, проходящие через узлы, в которых сидят атомы. Но узловых плоскостей можно провести сколько угодно по самым различным направлениям. Какие же из этих узловых плоскостей ограничивают выросший кристалл?

Обратим внимание прежде всего на следующее обстоятельство: разные узловые плоскости и линии заполнены узлами не одинаково плотно. Опыт показывает, что кристалл огранен плоскостями, которые гуще всего усеяны узлами, плоскости же пересекаются по ребрам, в свою очередь наиболее густо заселенным узлами.

Рис. 2.14 дает вид кристаллической решетки перпендикулярно к ее грани; проведены следы некоторых узловых плоскостей, перпендикулярных к чертежу. Из сказанного ясно, что у кристалла могут развиться грани, параллельные узловым плоскостям *I* и *III*, и не будет граней, параллельных редко усеянным узлами плоскостям *II*.

В настоящее время известно строение многих сотен кристаллов. Расскажем про строение простейших кристаллов и прежде всего тех, которые построены из атомов одного сорта.

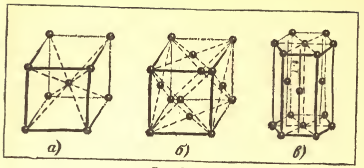


Рис. 2.15.

Наиболее распространены три типа решеток. Они показаны на рис. 2.15. Точками изображены центры атомов; линии, объединяющие точки, не имеют реального смысла. Они проведены лишь для того, чтобы сделать читателю более ясным характер пространственного расположения атомов.

Рис. 2.15, *а* и 2.15, *б* изображают кубические решетки. Чтобы представить себе эти решетки яснее, вообразите, что вы сложили простейшим способом — ребро к ребру, грань к грани — детские кубики. Если теперь мысленно разместить точки по вершинам и центрам объемов кубов, то возникнет кубическая решетка, изображенная на левом рисунке. Такая структура называется кубической объемноцентрированной. Если разместить точки по вершинам кубов и в центрах их граней, то возникнет кубическая решетка, изображенная на среднем рисунке. Она называется кубической гранецентрированной.

Третья решетка (рис. 2.15, *в*) называется плотнейшей гексагональной (т. е. шестиугольной). Чтобы понять происхождение этого термина и яснее представить себе расположение атомов в этой решетке, возьмем биллиардные шары и начнем укладывать их как можно плотнее. Прежде всего составим плотный слой — он выглядит так, как биллиардные шары, собранные «треугольником» перед началом игры (рис. 2.16). Отметим, что шар внутри треугольника имеет шесть соприкасающихся с ним соседей, и эти шесть соседей образуют шестиугольник. Продолжим укладку наложением слоев друг на друга. Если поместить шары следующего

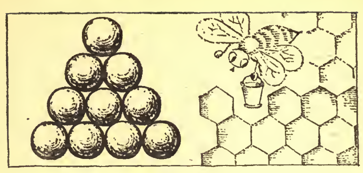


Рис. 2.16.

слоя непосредственно над шарами первого слоя, то такая упаковка была бы неплотной. Стараясь разместить в определенном объеме наибольшее число шаров, мы должны положить шары второго слоя в лунки первого, третьего слоя — в лунки второго и т. д. В гексагональной плотнейшей упаковке шары третьего слоя размещены так, что центры этих шаров лежат над центрами шаров первого слоя.

Центры атомов в гексагональной плотнейшей решетке расположены так, как центры шаров, плотно уложенных описанным способом.

В описанных трех решетках кристаллизуется множество элементов:

Гексагональная плотнейшая упаковка	Be, Co, Hf, Ti, Zn, Zr
Кубическая гранецентрированная	Al, Cu, Co, Fe, Au, Ge, Ni, Ti
Кубическая объемноцентрированная	Cr, Fe, Li, Mo, Ta, Ti, U, V

Из других структур упомянем лишь немногие. На рис. 2.17 изображена структура алмаза. Для этой структуры характерно то, что атом углерода алмаза имеет четыре ближайших соседа. Сопоставим это число с соответствующими числами описанных только что трех наиболее распространенных структур. Как видно из рисунков, в плотнейшей гексагональной упаковке у каждого атома 12 ближайших соседей, столько же соседей у атомов, образующих гранецентрированную кубическую решетку; в объемноцентрированной решетке у каждого атома 8 соседей.

Несколько слов скажем о графите, строение которого показано на рис. 2.18. Особенность этой структуры бросается в глаза. Графит состоит из слоев атомов, причем атомы одного слоя связаны между собой сильнее, чем атомы соседних слоев. Это связано с величиной межатомных расстояний: расстояние между соседями в одном слое в 2,5 раза меньше кратчайшего расстояния между слоями.

Наличие слабо связанных атомных слоев приводит к тому, что кристаллы графита легко расщепляются вдоль этих слоев. Поэтому твердый графит может служить смазочным материалом в тех случаях, когда невозможно применять смазочные масла,— например, при очень низких или очень высоких температурах. Графит — твердый смазочный материал.

Трение между двумя телами сводится, грубо говоря, к тому, что микроскопические выступы одного тела западают во впадины другого. Усилие, достаточное для того, чтобы расщепить микроскопический графитовый кристаллик, много меньше сил трения, поэтому наличие графитовой смазки значительно облегчает скольжение одного тела по другому.

Бесконечно разнообразны структуры кристаллов химических соединений. Крайними — в смысле разли-

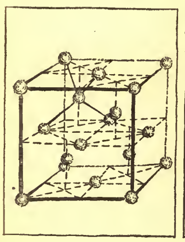


Рис. 2.17.

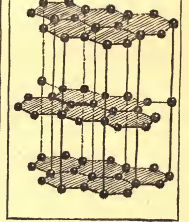


Рис. 2.18.



Рис. 2.19. Рис. 2.20.

чий — примерами могут служить структуры каменной соли и двуокиси углерода, изображенные на рис. 2.19 и 2.20.

Кристаллы каменной соли (рис. 2.19) состоят из чередующихся вдоль осей куба атомов натрия (маленькие темные шары) и хлора (большие светлые шары). Каждый атом натрия имеет шесть равноотстоящих соседей другого сорта. То же относится и к хлору. Но где же молекула хлористого натрия? Ее нет; в кристалле отсутствует не только группа из одного атома натрия и одного атома хлора, но и вообще какая бы то ни была группа атомов не выделяется своим сближением среди других.

Химическая формула NaCl не дает нам оснований говорить, что «вещество построено из молекул NaCl ». Химическая формула указывает лишь, что вещество построено из одинакового числа атомов натрия и хлора.

Вопрос о существовании молекул у вещества решается структурой. Если в ней не выделяется группа близких атомов, то молекул нет.

Кристалл углекислого газа CO_2 (сухого льда, который лежит в ящиках у продавщиц мороженого) — пример молекулярного кристалла (рис. 2.20).

Центры атомов кислорода и углерода молекулы CO_2 расположены вдоль прямой линии (см. рис. 2.2). Расстояние С—О равно 1,3 Å, а расстояние между атомами кислорода соседних молекул — около 3 Å. Ясно, что при таких условиях мы сразу же «узнаем» молекулу в кристалле.

Молекулярные кристаллы представляют собой плотные упаковки молекул. Чтобы это видеть, надо обрисовать контуры молекул. Это и сделано на рис. 2.20.

Все органические вещества дают молекулярные кристаллы. Органические молекулы зачастую содержат многие десятки и сотни атомов (а от таких, которые состоят из десятков тысяч атомов, мы поговорим особо в отдельной главе). Изобразить их упаковку графически невозможно. Поэтому вы можете увидеть в книгах рисунки, подобные рис. 2.21. Молекулы этого органического вещества построены из атомов углерода. Стерженьки символизируют валентные связи. Молекулы как бы висят в воздухе. Но не верьте глазам своим. Чертеж сделан таким лишь для того, чтобы можно было рассмотреть, как расположены молекулы в кристалле. Для простоты авторы рисунка даже не изобразили атомов

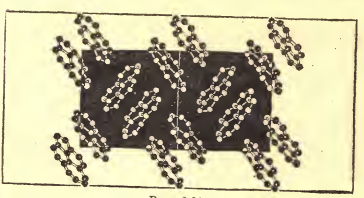


Рис. 2,21.

водорода, присоединенных к внешним атомам углерода (впрочем, химики так делают очень часто). Тем более авторы не сочли нужным «оконтурить» молекулу — придать ей форму. Если это сделать, то мы увидели бы, что принцип упаковки молекул — ключ к замку — работает в этом случае, как и в других ему подобных.

ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Мы уже говорили о том, что аморфные тела это редкость в мире твердых тел. Большинство окружающих нас предметов состоит из маленьких кристаллических зернышек, размерами около одной тысячной доли миллиметра.

Еще в прошлом веке зернистое строение металлов было обнаружено исследователями. Помог самый обычный микроскоп. Пришлось только приспособить его так, чтобы вести рассмотрение не «на просвет», а на «отражение». Так поступают и сегодня.

Картинка, которая представляется глазу, показана на рис. 2.22. Границы зернышек обычно видны совершенно отчетливо. Как правило, на этих границах скапливаются примеси.

От величины зерен, от того, что делается на их границах, от ориентации зерен зависят в огромной степени свойства материала. Поэтому физики потратили очень много труда на изучение поликристаллических веществ. То что каждое зерно является кристалликом, было доказано с помощью рентгеноструктурного анализа, о котором мы уже один раз обещали рассказать читателю. Обещаем это сделать вторично.

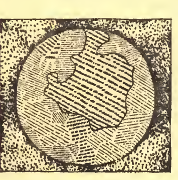


Рис. 2.22.

Всякая обработка металла сказывается на его зернах. Вот получен кусок литого металла: зерна его расположены беспорядочно, размер их довольно велик. Из металла делают проволоку, протягивают

ее. Как ведут себя при этом кристаллические зерна? Исследования показали, что изменение формы твердого тела при протягивании проволоки или другой механической обработке вызывает раздробление кристаллических зерен. Одновременно под действием механических сил в их расположении появляется некоторый порядок. О каком порядке может идти здесь речь? Ведь обломки зерен совершенно бесформенны.

Это верно, внешняя форма обломка может быть какой угодно, но обломок кристалла есть все же кристалл: атомы в его решетке упакованы так же правильно, как и в хорошо ограненном кристалле. Поэтому в каждом обломке можно указать, как расположена его элементарная ячейка. До обработки ячейки строго упорядочены только в пределах каждого отдельного зерна — общего порядка обычно нет. После же обработки зерна выстраиваются так, что в расположении их ячеек проступает некоторый общий порядок, называемый текстурой, например, диагонали ячеек всех зерен устанавливаются примерно параллельно направлению обработки.

На рис. 2.23 текстура изображена на примере упорядоченности некоторых определенных, отмеченных нами в зернах плоскостей — плоскостей наиболее плотного заполнения атомами, которые обозначены рядами точек.

Различные виды обработки (прокат, ковка, протяжка) приводят к текстурам различных типов. В одних случаях зерна поворачиваются так, что их элементарные ячейки выстраиваются вдоль направления обработки диагональю, в других случаях — ребром куба и т. д. Чем совершеннее прокат или протяжка, тем совершеннее и текстура кристаллических зерен металла. Наличие текстуры очень сильно влияет на механические свойства изделия. Изучение расположения и размеров кристаллических зе-



Рис. 2.23.

рен в металлических изделиях пролило свет на сущность механической обработки металлов и указало, как следует правильно вести ее.

С перестройкой кристаллических зерен связан и другой важнейший технических процесс — отжиг. Если нагревать прокатанный или протянутый металл, то при достаточно высокой температуре начинается рост новых кристаллов за счет старых. В результате отжига текстура постепенно разрушается; новые кристаллы располагаются беспорядочно. По мере повышения температуры (или просто при увеличении длительности отжига) новые зерна растут, старые исчезают. Зерна могут вырасти до видимых глазом размеров. Отжиг резко меняет свойства металла. Металл становится более пластичным, менее твердым. Это происходит потому, что зерна становятся крупнее, и текстура исчезает.

Глава 3

ТЕМПЕРАТУРА

ТЕРМОМЕТР

Если привести в соприкосновение два тела, нагретых по-разному, то более нагретое будет охлаждаться, а холодное станет теплее. Про такие два тела говорят, что они обмениваются теплом.

Как уже говорилось, теплообмен — это вид перехода энергии; мы называем более горячим то тело, которое отдает энергию. Мы ощущаем тело горячим, если оно нагревает руку, т. е. передает ей энергию. Наоборот, если тело ощущается холодным, то это значит, оно отнимает энергию у нашего тела.

Про тело, которое отдает тепло (т. е. путем теплообмена отдает энергию), мы говорим: его температура выше температуры того тела, которое забирает это тепло.

Наблюдая за тем, охлаждается или нагревается интересующий нас предмет в присутствии того или иного тела, мы найдем для этого предмета «свое место» в ряду нагретых тел. Температура — это своего рода метка, указывающая, для каких тел интересующий нас предмет будет дарителем, а для каких — получателем тепла.

Температуру измеряют термометрами.

В основу устройства термометров можно положить использование различных свойств тел, чувствительных к температуре. Чаще всего пользуются свойством тел расширяться при повышении температуры.

Если при соприкосновении с разными предметами тело термометра будет изменять свой объем, это значит, что тела имеют разную температуру. Когда объем тела термометра больше — температура выше, а когда объем меньше — температура ниже.

Самые различные тела могут служить термометрами: и жидкие, как ртуть или спирт, и твердые — металлы, и газообразные. Но ведь разные тела расширяются поразному, и ртутные, спиртовые, газовые и прочие градусы совпадать не будут. Конечно, всегда можно отметить на всех термометрах две основные точки — температуры таяния льда и кипения воды. Поэтому 0 и 100 градусов Цельсия все термометры всегда покажут одинаково. Но между 0 и 100 градусами тела будут расширяться не одинаково. Одно тело быстро расширяется между 0 и 50 градусами ртутного термометра и медленно на второй части этого интервала, а другое — наоборот.

Изготовив термометры с разными расширяющимися телами, мы обнаружим заметные расхождения в их показаниях, несмотря на то, что в основных точках показания будут совпадать. Более того, водяной термометр привел бы нас к такому открытию: если охлажденное до нуля тело положить на электроплитку, то его «водяная температура» сначала бы падала, а потом росла. Это происходит по той причине, что вода при нагревании сначала уменьшает свой объем и лишь потом ведет себя «нормально», т. е. увеличивает объем при нагревании.

Мы видим, что необдуманный выбор вещества для термометра может завести нас в тупик.

Но чем же тогда руководствоваться при выборе «правильного» термометра? Какое тело идеально для этой цели?

О таких идеальных телах мы уже говорили. Это идеальные газы. Взаимодействие частиц у идеального газа отсутствует, и, изучая расширение идеального газа, мы изучаем, как меняется движение его молекул. Именно по этой причине идеальный газ является идеальным телом для термометра.

И действительно, сразу бросается в глаза, что если вода расширяется иначе, чем спирт, спирт — иначе, чем стекло, стекло — иначе, чем железо, то водород, кислород, азот или любой другой газ в состоянии разрежения, которого достаточно для того, чтобы заслужить название идеального, расширяются при нагревании в точности одинаково.

Таким образом, основой для определения температуры в физике служит изменение объема определенного

количества идеального газа. Разумеется, ввиду сильной сжимаемости газов надо особенно тщательно следить за тем, чтобы газ находился при постоянном давлении.

Для того чтобы проградуировать газовый термометр, мы должны точно измерить объем взятого нами газа при 0 °С и при 100 °С. Разность объемов V_{100} и V_0 мы разделим на 100 равных частей. Другими словами, изменение объема газа на $\frac{1}{100}(V_{100}-V_0)$ и соответствует одному градусу Цельсия (1°С).

Теперь положим, что наш термометр показывает объем V. Какая температура t °С соответствует этому объему? Нетрудно сообразить, что

$$t\,°\mathrm{C}=\frac{V-V_0}{V_{100}-V_0}100, \quad \text{т. е.} \quad \frac{t\,°\mathrm{C}}{100}=\frac{V-V_0}{V_{100}-V_0}.$$

Этим равенством каждый объем V мы относим к температуре t и получаем ту температурную шкалу *), которой пользуются в быту.

При увеличении температуры объем газа неограниченно возрастает — нет никакого теоретического предела росту температуры. Напротив, низкие (отрицательные в шкале Цельсия) температуры имеют предел.

Действительно, что произойдет при понижении температуры? Реальный газ в конце концов превратится

*) Шкала Цельсия, в которой за 0°С принята температура тающего льда, а за 100°С — температура кипения воды (обе — при нормальном давлении 760 мм рт. ст.), очень удобна. Несмотря на это, англичане и американцы пользовались до сих пор такой температурной шкалой, которая кажется нам очень странной. Как, например, будет воспринята вами такая фраза из английского романа: «Лето стояло не жаркое, температура была 60—70 градусов»? Опечатка? Нет, шкала Фаренгейта (°F).

В Англии температура редко падает ниже —20°С. Фаренгейт подобрал смесь льда с солью, имеющую примерно такую температуру, и принял эту температуру за нуль. За 100 градусов в этой шкале была принята, по словам автора, нормальная температура человеческого тела. Однако для установления этой точки Фаренгейт, вероятно, пользовался услугами человека, которого слегка лихорадило. Средней нормальной температуре человеческого тела в шкале Фаренгейта соответствует 98°F. В этой шкале вода замерзает при +32°F, а кипит при 212°F. Формула перехода будет

$$t°\mathrm{C}=\frac{5}{9}(t-32)\,°\mathrm{F}.$$

в жидкость, а при еще большем снижении температуры затвердеет. Молекулы газа соберутся в маленький объем. Но чему будет равен этот объем для нашего термометра, заполненного идеальным газом? Его молекулы не взаимодействуют между собой и не имеют собственного объема. Значит, понижение температуры приведет идеальный газ к нулевому объему. Приблизиться практически сколь угодно близко к поведению, характерному для идеального газа, в данном случае к нулевому значению объема, вполне возможно. Для этого газовый термометр надо заполнить все более и более разреженным газом. Поэтому мы не погрешим против истины, считая предельно малый объем газа равным нулю.

Согласно нашей формуле объему, равному нулю, соответствует самая низкая температура. Эта температура и называется абсолютным нулем температуры.

Для того чтобы определить положение абсолютного нуля на шкале Цельсия, в выведенную формулу температуры надо подставить значение объема, равное нулю, $V=0$. Таким образом, температура абсолютного нуля равна $-\frac{100\,V_0}{V_{100}-V_0}$.

Оказывается, эта замечательная точка соответствует температуре примерно -237 °C (точнее, $-273{,}15$ °C).

Итак, нет температур ниже абсолютного нуля; ведь они соответствуют отрицательным объемам газа. Говорить о более низких температурах бессмысленно. Получить температуры ниже абсолютного нуля так же невозможно, как изготовить проволоку с диаметром меньше нуля.

При абсолютном нуле тело нельзя охладить, т. е. нельзя отнять у него энергию. Иными словами, при абсолютном нуле тела и частицы, из которых они построены, обладают наименьшей возможной энергией. Это означает, что при абсолютном нуле кинетическая энергия равна нулю, а потенциальная имеет наименьшее возможное значение.

Поскольку абсолютный нуль есть самая низкая температура, то естественно, что в физике, особенно в тех ее разделах, где фигурируют низкие температуры, пользуются абсолютной шкалой температур, в которой отсчет ведется от абсолютного нуля. Ясно, что $T_{абс}=(t+$ $+273)$ °C. Комнатная температура в абсолютной шкале

лежит около 300 градусов. Абсолютную шкалу температур называют также шкалой Кельвина — по имени известного английского ученого XIX в., и вместо обозначения $T_{абс}$ употребляют обозначение T К.

Формула газового термометра, определяющая температуру T, может быть записана для абсолютной температуры в виде

$$T = 100\frac{V-V_0}{V_{100}-V_0}+273.$$

Пользуюсь равенством $\frac{100\,V_0}{V_{100}-V_0}=273$, приходим к простому результату:

$$\frac{T}{273}=\frac{V}{V_0}.$$

Таким образом, абсолютная температура просто пропорциональна объему идеального газа.

Точные измерения температуры требуют от физика всевозможных ухищрений. В довольно широком интервале температур ртутные, спиртовые (для Арктики) и другие термометры градуируются по газовому термометру. Однако и он непригоден при температурах, весьма близких к абсолютному нулю (ниже 0,7 К), когда все газы сжижаются, а также при температурах выше 600°С, когда газы проникают через стекло. Для высоких и очень низких температур пользуются иными принципами измерения температур.

Что же касается практических способов измерения температуры, то их множество. Большое значение имеют приборы, основанные на электрических явлениях. Сейчас важно запомнить лишь одно — при любых измерениях температуры мы должны быть уверены, что измеряемая величина вполне совпадает с тем, что дало бы измерение расширения разреженного газа.

Высокие температуры возникают в печах и горелках. В кондитерских печах температура достигает 220—280°С. Более высокие температуры применяются в металлургии — 900—1000°С дают закалочные печи, 1400—1500°С — кузнечные. В сталеплавильных печах температура достигает 2000°С.

Рекордно высокие печные температуры получают с помощью электрической дуги (около 5000°С). Пламя

дуги позволяет «расправиться» с самыми тугоплавкими металлами.

А какова температура пламени газовой горелки? Температура внутреннего голубоватого конуса пламени всего лишь 300°C. Во внешнем конусе температура доходит до 1800°C.

Несравненно более высокие температуры возникают при взрыве атомной бомбы. По косвенным оценкам, температура в центре взрыва достигает многих миллионов градусов.

В самое последнее время предприняты попытки получить такие сверхвысокие температуры в специальных лабораторных установках, изготовляемых у нас и за рубежом. На кратчайшее мгновение удавалось достигнуть температур в несколько миллионов градусов.

Сверхвысокие температуры существуют и в природе, но не на Земле, а в других телах Вселенной. В центрах звезд, в частности Солнца, температура достигает десятков миллионов градусов. Поверхностные же участки звезд имеют значительно более низкую температуру, не превышающую 20 000 градусов. Поверхность Солнца нагрета до 6000 градусов.

ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Свойства идеального газа, давшего нам определение температуры, очень просты. При постоянной температуре действует закон Бойля—Мариотта: произведение pV при изменениях объема или давления остается неизменным. При неизменном давлении сохраняется частное V/T, как бы ни менялись объем или температура. Эти два закона легко объединить. Ясно, что выражение pV/T остается тем же, как при постоянной температуре, но изменяющихся V и p, так и при постоянном давлении, но изменяющихся V и T. Выражение pV/T остается постоянным при изменении не только любой пары, но и одновременно всех трех величин — p, V и T. Закон $pV/T = \text{const}$, как говорят, определяет уравнение состояния идеального газа.

Идеальный газ выбран в качестве термометра потому, что только его свойства связаны с одним лишь дви-

жением (но не с взаимодействием) молекул.

Каков же характер связи между движением молекул и температурой? Для ответа на этот вопрос надо найти связь между давлением газа и движением в нем молекул.

В сферическом сосуде радиуса R заключено N молекул газа (рис. 3.1). Проследим за какой-либо молекулой, например той, что движется в данный момент слева направо вдоль хорды длиной l. На столкновения

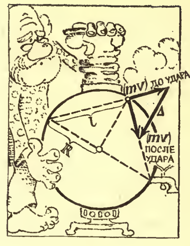


Рис. 3.1.

молекул обращать внимания не будем: такие встречи не сказываются на давлении. Долетев до границы сосуда, молекула ударится о стенку и с той же скоростью (удар упругий) понесется уже в другом направлении. В идеале такое путешествие по сосуду могло бы продолжаться вечно. Если v — скорость молекулы, то каждый удар будет происходить через l/v секунд, т. е. в секунду каждая молекула ударится v/l раз. Непрерывная дробь ударов N молекул сливается в единую силу давления.

По закону Ньютона сила равна изменению импульса в единицу времени. Обозначим изменение импульса при каждом ударе через Δ. Это изменение происходит v/l раз в секунду. Значит, вклад в силу со стороны одной молекулы будет $\frac{\Delta}{l}\cdot v$.

На рис. 3.1 построены векторы импульсов до и после удара, а также вектор приращения импульса Δ. Из подобия возникших при построении треугольников следует: $\Delta/l = mv/R$. Вклад в силу со стороны одной молекулы примет вид

$$\frac{mv^2}{R}.$$

Так как длина хорды не вошла в формулу, то ясно, что молекулы, движущиеся по любой хорде, дают одинаковый вклад в силу. Конечно, изменение импульса при косом ударе будет меньше, но зато удары в этом случае будут чаще. Расчет показал, что оба эффекта в точности компенсируются.

Так как в сфере N молекул, то суммарная сила будет равна

$$\frac{Nmv_{\text{ср}}^2}{R},$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость молекул.

Давление p газа, равное силе, деленной на площадь сферы $4\pi R^2$, будет равно

$$p = \frac{Nmv_{\text{ср}}^2}{R \cdot 4\pi R^2} = \frac{\frac{1}{3} Nmv_{\text{ср}}^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{Nmv_{\text{ср}}^2}{3V},$$

где V — объем сферы.

Таким образом,

$$pV = \frac{1}{3} Nmv_{\text{ср}}^2.$$

Это уравнение было впервые выведено Даниилом Бернулли в 1738 г. *).

Из уравнения состояния идеального газа следовало: $pV = \text{const} \cdot T$; из выведенного уравнения видим, что pV пропорционально $v_{\text{ср}}^2$. Значит,

$$T \sim v_{\text{ср}}^2, \quad \text{или} \quad v_{\text{ср}} \sim \sqrt{T},$$

т. е. средняя скорость молекул идеального газа пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры.

ЗАКОН АВОГАДРО

Пусть вещество представляет собой смесь различных молекул. Нет ли такой физической величины, характеризующей движение, которая была бы одинакова для

*) Швейцарец по происхождению, Д. Бернулли работал и жил в России; он был петербургским академиком. Не меньшую известность имеет деятельность Жана Бернулли и Якова (Жака) Бернулли.

всех этих молекул, например для водорода и кислорода, находящихся при одинаковой температуре?

Механика дает ответ на этот вопрос. Можно доказать, что одинаковыми у всех молекул будут средние кинетические энергии поступательного движения $mv_{\text{ср}}^2/2$.

Это означает, что при данной температуре средние квадраты скорости молекул обратно пропорциональны массе частиц:

$$v_{\text{ср}}^2 \sim \frac{1}{m}, \quad v_{\text{ср}} \sim \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

Вернемся теперь к уравнению $pV = \frac{1}{3} Nmv_{\text{ср}}^2$. Так как при данной температуре величины $mv_{\text{ср}}^2$ одинаковы для всех газов, то число молекул N, заключенных в данном объеме V при определенных давлении p и температуре T, одинаково для всех газов. Этот замечательный закон был впервые сформулирован Авогадро.

Сколько же молекул приходится на 1 см^3? Оказывается, в 1 см^3 при 0°С и 760 мм рт. ст. находится $2{,}7 \cdot 10^{19}$ молекул. Это огромное число. Чтобы вы почувствовали, сколь оно велико, приведем такой пример. Положим, что газ удаляется из маленького сосудика объемом 1 см^3 с такой скоростью, что в каждую секунду уходит миллион молекул. Нетрудно подсчитать, что сосуд полностью освободится от газа через миллион лет!

Закон Авогадро указывает, что при определенных давлении и температуре отношение числа молекул к объему, в котором они заключены, N/V есть величина одинаковая для всех газов.

Так как плотность газа $\rho = Nm/V$, то отношение плотностей газов равно отношению их молекулярных масс:

$$\rho_1/\rho_2 = m_1/m_2.$$

Относительные массы молекул могут быть поэтому установлены простым взвешиванием газообразных веществ. Такие измерения сыграли в свое время большую роль в развитии химии. Из закона Авогадро следует также, что для моля любого вещества, находящегося в состоянии идеального газа, $pV = kN_{\text{А}}T$, где k — универсальная постоянная (она носит имя замечательного немецкого физика Людвига Больцмана), равная $1{,}38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К. Произведение $R = kN_{\text{А}}$ называют универсальной газовой постоянной.

Закон идеального газа записывают часто как

$$pV = \mu RT,$$

где μ — количество вещества, выраженное в молях. Это уравнение часто используется на практике.

СКОРОСТИ МОЛЕКУЛ

Теория указывает, что при одной температуре средние кинетические энергии молекул $mv_{ср}^2/2$ одинаковы. При нашем определении температуры эта средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре. Комбинируя уравнения идеального газа и Бернулли, найдем:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{ср} = \frac{2}{3} kT.$$

Измерение температуры термометром, заполненным идеальным газом, придает этой мере простой смысл: температура пропорциональна среднему значению энергии поступательного движения молекул. Поскольку мы живем в трехмерном пространстве, про точку, движущуюся как угодно, можно сказать — она имеет три степени свободы. Значит, на одну степень свободы движущейся частицы приходится $kT/2$ энергии.

Определим среднюю скорость молекул кислорода при комнатной температуре, которую мы для круглого счета примем в 27°C=300 K. Молекулярная масса кислорода 32, а масса одной молекулы равна $32/(6 \cdot 10^{23})$. Простое вычисление даст $v_{ср}=4{,}8 \cdot 10^4$ см/с, т. е. около 500 м/с. Существенно быстрее движутся молекулы водорода. Их массы в 16 раз меньше и скорости в $\sqrt{16}=4$ раза больше, т. е. при комнатной температуре составляют около 2 км/с. Прикинем, с какой тепловой скоростью движется маленькая, видимая в микроскоп частичка. Обычный микроскоп позволяет увидеть пылинку диаметром в 1 мкм (10^{-4} см). Масса такой частицы при плотности, близкой к единице, будет что-нибудь около $5 \cdot 10^{-13}$ г. Для ее скорости получим около 0,5 см/с. Неудивительно, что такое движение вполне заметно.

Скорость броуновского движения горошины с массой в 0,1 г будет уже всего только 10^{-6} см/с. Немудре-

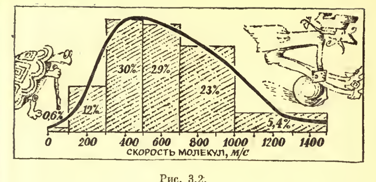


Рис. 3.2.

но, что мы не видим броуновского движения таких частиц.

Мы говорим о средних скоростях молекулы. Но ведь не все молекулы движутся с одинаковыми скоростями, какая-то доля молекул движется быстрее, а какая-то медленнее. Все это, оказывается, можно рассчитать. Приведем только результаты.

При температуре около 15°С, например, средняя скорость молекул азота равна 500 м/с, со скоростями от 300 до 700 м/с движется 59% молекул. С малыми скоростями — от 0 до 100 м/с — движется всего лишь 0,6% молекул. Быстрых молекул со скоростями свыше 1000 м/с в газе всего лишь 5,4% (см. рис. 3.2).

Основание каждого столбика рисунка построено на интервале скоростей, о котором идет речь, а площадь пропорциональна доле молекул, скорости которых лежат в этом интервале.

Можно рассчитать и распределение молекул по разным значениям энергии поступательного движения.

Число молекул, энергия которых более чем в два раза превосходит среднюю, уже меньше 10%. Доля еще более «энергичных» молекул тает по мере увеличения энергии во все возрастающей степени. Так, молекул, энергия которых в 4 раза больше средней,— всего 0,7%, в 8 раз больше средней —$0{,}06 \cdot 10^{-4}$ %, в 16 раз больше средней — $2 \cdot 10^{-8}$ %.

Энергия молекулы кислорода, движущейся со скоростью 11 км/с, равна $23 \cdot 10^{-12}$ эрг. Средняя энергия

молекулы при комнатной температуре равна всего $6 \cdot 10^{-14}$ эрг. Таким образом, энергия «одиннадцатикилометровой молекулы» по крайней мере в 500 раз больше энергии молекулы со средней скоростью. Неудивительно, что доля молекул со скоростями выше 11 км/с равна невообразимо малому числу — порядка 10^{-300}.

Но почему нас заинтересовала скорость 11 км/с? В книге 1 мы говорили о том, что оторваться от Земли могут лишь тела, имеющие эту скорость. Значит, забравшись на большую высоту молекулы могут потерять связь с Землей и отправиться в далекое межпланетное путешествие, но для этого надо иметь скорость 11 км/с. Доля таких быстрых молекул, как мы видим, настолько ничтожна, что опасность потери атмосферы Земле не грозит даже через миллиарды лет.

Скорость ухода атмосферы необычайно сильно зависит от гравитационной энергии $\gamma \frac{Mm}{r}$. Если средняя кинетическая энергия молекулы во много раз меньше гравитационной энергии, то отрыв молекул практически невозможен. На поверхности Луны гравитационная энергия в 20 раз меньше, что дает для знегрии «убегания» молекулы кислорода значение $1,5 \cdot 10^{-12}$ эрг. Это значение превышает величину средней кинетической энергии молекулы всего лишь в 20—25 раз. Доля молекул, способных оторваться от Луны, равна 10^{-17}. Это уже совсем не то, что 10^{-300}, и подсчет показывает, что воздух будет довольно быстро уходить с Луны в межпланетное пространство. Неудивительно, что на Луне нет атмосферы.

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ

Если нагреть тело, то движение атомов (молекул) будет более интенсивным. Они станут расталкивать друг друга и займут больше места. Этим и объясняется хорошо известный факт: при нагревании твердые, жидкие и газообразные тела расширяются.

О тепловом расширении газов долго говорить не приходится: ведь пропорциональность температуры объему газа была положена в основу нашей температурной шкалы.

Из формулы $V = \frac{V_0}{273} \cdot T$ мы видим, что объем газа при постоянном давлении возрастает при нагревании на 1°С на 1/273 часть (т. е. на 0,0037) его объема при 0°С (это положение иногда называют законом Гей-Люссака).

В обычных условиях, т. е. при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении, расширение большинства жидкостей раза в два-три меньше расширения газов.

Мы уже не раз говорили о своеобразии расширения воды. При нагревании от 0 до 4°С объем воды уменьшается с нагреванием. Эта способность в расширении воды играет колоссальную роль в жизни на Земле. Осенью по мере охлаждения воды верхние остывшие слои становятся плотнее и погружаются на дно. На их место снизу поступает более теплая вода. Но такое перемешивание происходит только до тех пор, пока температура воды не понизится до 4°С. При дальнейшем падении температуры верхние слои уже не будут сжиматься, значит, не будут становиться тяжелее и не станут опускаться на дно. Начиная с этой температуры, верхний слой, постепенно охлаждаясь, доходит до нуля градусов и замерзает.

Только эта особенность воды и препятствует промерзанию рек до дна. Если бы вода вдруг потеряла свою замечательную особенность, даже при скромной фантазии легко представить себе бедственные последствия этого.

Тепловое расширение твердых тел существенно меньше, чем тепловое расширение жидкостей. Оно в сотни и тысячи раз меньше расширения газов.

Во многих случаях тепловое расширение является досадной помехой. Так, изменение размеров движущихся частей часового механизма с переменой температуры привело бы к изменению хода часов, если бы для этих тонких деталей не применялся особый сплав — инвар (инвариантный в переводе означает неизменный, отсюда и название «инвар»). Инвар — сталь с большим содержанием никеля — широко применяется в приборостроении. Стержень из инвара удлиняется лишь на одну миллионную долю своей длины при изменении температуры на 1°С.

Ничтожное, казалось бы, тепловое расширение твердых тел может привести к серьезным последствиям. Дело в том, что нелегко мешать тепловому расширению твердых тел из-за их малой сжимаемости.

При нагревании на 1°С стального стержня его длина возрастает всего на одну стотысячную, т. е. на незаметную глазом величину. Однако, чтобы воспрепятствовать расширению и сжать стержень на одну стотысячную, нужна сила в 20 кгс на 1 см². И это только для того, чтобы уничтожить действие повышения температуры всего на 1°С!

Распирающие силы, возникающие из-за теплового расширения, могут привести к поломкам и катастрофам, если с ними не считаться. Так, чтобы избежать действия этих сил, рельсы железнодорожного полотна укладывают с зазорами. Об этих силах приходится помнить при обращении со стеклянной посудой, которая легко трескается при неравномерном нагревании. В лабораторной практике поэтому пользуются лишенной этого недостатка посудой из кварцевого стекла (плавленый кварц — окись кремния, находящаяся в аморфном состоянии). При одном и том же нагреве медный брусок удлинится на миллиметр, а такой же брусок кварцевого стекла изменит свою длину на незаметную глазом величину 30—40 мкм. Расширение кварца настолько ничтожно, что кварцевый сосуд можно нагреть на несколько сот градусов, а потом без опасений бросить его в холодную воду.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Внутренняя энергия тела, разумеется, зависит от температуры. Чем больше надо нагреть тело, тем больше требуется энергии. На нагрев от T_1 до T_2 к телу требуется подвести в виде тепла энергию Q, равную

$$Q=C(T_2-T_1).$$

Здесь C — коэффициент пропорциональности, который называется теплоемкостью тела. Из формулы следует определение понятия теплоемкости: C есть количество тепла, необходимое для повышения температуры на 1°С. Теплоемкость и сама зависит от температуры: наг-

рев от 0 до 1°C, или от 100 до 101°C, требует несколько различных количеств тепла.

Величины C относят обычно к единице массы и называют удельными теплоемкостями. Тогда их обозначают строчными буквами c.

Количество тепла, идущее на нагревание тела массы m, запишется формулой

$$Q=mc\,(T_2-T_1).$$

Мы в дальнейшем будем пользоваться понятием удельной теплоемкости, но для краткости говорить о теплоемкости тел. Дополнительным ориентиром всегда будет размерность величины.

Значения теплоемкостей колеблются в довольно широких пределах. Разумеется, теплоемкость воды в калориях на градус по определению равна 1.

Большинство тел имеет теплоемкость меньше, чем у воды. Так, у большинства масел, спиртов и других жидкостей теплоемкости близки к 0,5 кал/(г·К). Кварц, стекло, песок имеют теплоемкость порядка 0,2. Теплоемкость железа и меди — около 0,1 кал/(г·К). А вот примеры теплоемкостей некоторых газов: водород — 3,4 кал/(г·К), воздух — 0,24 кал/(г·К).

Теплоемкости всех тел, как правило, уменьшаются с падением температуры и при температурах, близких к абсолютному нулю, принимают у большинства тел ничтожные значения. Так, теплоемкость меди при температуре 20 К равна всего 0,0035; это в двадцать четыре раза меньше, чем при комнатной температуре.

Знание теплоемкостей может пригодиться для решения различных задач о распределении тепла между телами.

Различие между теплоемкостями воды и почвы является одной из причин, определяющих разницу между морским и континентальным климатом. Обладая примерно в пять раз большей теплоемкостью, чем почва, вода медленно нагревается и так же медленно остывает.

Летом вода в приморских районах, нагреваясь медленнее, чем суша, охлаждает воздух, а зимой теплое море постепенно остывает, отдавая тепло воздуху и смягчая мороз. Нетрудно подсчитать, что 1 м³ морской воды,

охлаждаясь на 1°С, нагреет на 1°С 3000 м³ воздуха. Поэтому в приморских районах колебания в температуре и разница между температурой зимы и лета менее значительны, чем в континентальных.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Каждый предмет может служить «мостиком», по которому перейдет тепло от тела более нагретого к телу менее нагретому.

Таким мостиком является, например, чайная ложка, опущенная в стакан с горячим чаем. Металлические предметы очень хорошо проводят тепло. Конец ложки в стакане становится теплым уже через секунду.

Если нужно перемешивать какую-либо горячую смесь, то ручку у мешалки надо сделать из дерева или пластмассы. Эти твердые тела проводят тепло в 1000 раз хуже, чем металлы. Мы говорим «проводят тепло», но с таким же успехом можно было бы сказать «проводят холод». Конечно, свойства тела не изменяются от того, в какую сторону идет по нему поток тепла. В морозные дни мы остерегаемся на улице притрагиваться голой рукой к металлу, но без опаски беремся за деревянную ручку.

К плохим проводникам тепла — их также называют теплоизоляторами — относятся дерево, кирпич, стекло, пластмассы. Из этих материалов делают стены домов, печей и холодильников.

К хорошим проводникам относятся все металлы. Наилучшими проводниками являются медь и серебро — они проводят тепло в два раза лучше, чем железо.

Конечно, «мостиком» для перехода тепла может служить не только твердое тело. Жидкости тоже проводят тепло, но много хуже, чем металлы. По теплопроводности металлы превосходят твердые и жидкие неметаллические тела в сотни раз.

Чтобы показать плохую теплопроводность воды, делают такой опыт. В пробирке с водой закрепляют на дне кусочек льда, а верх пробирки подогревают на газовой горелке — вода начинает кипеть, а лед еще и не думает таять. Если бы пробирка была без воды и из металла, то кусочек льда начал бы таять почти сразу же.

Вода проводит тепло примерно в двести раз хуже, чем медь.

Газы проводят тепло в десятки раз хуже, чем конденсированные неметаллические тела. Теплопроводность воздуха в 20 000 раз меньше теплопроводности меди.

Плохая теплопроводность газов позволяет взять в руку кусок сухого льда, температура которого —78°С, и даже держать на ладони каплю жидкого азота, имеющего температуру —196°С. Если не сжимать пальцами эти холодные тела, то «ожога» не будет. Дело заключается в том, что при очень энергичном кипении капля жидкости или кусок твердого тела покрывается «паровой рубашкой» и образовавшийся слой газа служит теплоизолятором.

Сфероидальное состояние жидкости — так называется состояние, при котором капли окутаны паром,— образуется в том случае, если вода попадает на очень горячую сковородку. Капля кипятка, попавшая на ладонь, сильно обжигает руку, хотя разность температур кипятка и человеческого тела меньше разности температур руки и жидкого воздуха. Рука холоднее капли кипятка, тепло уходит от капли, кипение прекращается и паровая рубашка не образуется.

Нетрудно сообразить, что самым лучшим изолятором тепла является вакуум — пустота. В пустоте нет переносчиков тепла, и теплопроводность будет наименьшей.

Значит, если мы хотим создать тепловую защиту, спрятать теплое от холодного или холодное от теплого, то лучше всего соорудить оболочку с двойными стенками и выкачать воздух из пространства между стенками. При этом мы сталкиваемся со следующим любопытным обстоятельством. Если по мере разрежения газа следить за изменением его теплопроводности, то мы обнаружим, что вплоть до того момента, когда давление достигает нескольких миллиметров ртутного столба, теплопроводность практически не меняется и лишь при переходе к более высокому вакууму наши ожидания оправдываются — теплопроводность резко падает.

В чем же дело?

Для того чтобы понять это явление, надо попробовать наглядно представить себе, в чем заключается явление переноса тепла в газе.

Передача тепла от нагретого места в холодные происходит путем передачи энергии от одной молекулы к соседней. Понятно, что соударения быстрых молекул с медленными обычно приводят к ускорению медленных молекул и замедлению быстрых. А это и означает, что горячее место станет холоднее, а холодное нагреется.

Как же сказывается уменьшение давления на передаче тепла? Так как уменьшение давления понижает плотность, уменьшится и число встреч быстрых молекул с медленными, при которых происходит передача энергии. Это уменьшало бы теплопроводность. Однако, с другой стороны, уменьшение давления приводит к увеличению длины свободного пробега молекул, которые, таким образом, переносят тепло на большие расстояния, а это способствует увеличению теплопроводности. Расчет показывает, что оба эффекта уравновешиваются, и способность к передаче тепла не меняется некоторое время при откачке воздуха.

Так будет до тех пор, пока вакуум не станет настолько значительным, что длина пробега сравняется с расстоянием между стенками сосуда. Теперь дальнейшее понижение давления уже не может изменить длины пробега молекул, «болтающихся» между стенками, падение плотности не «уравновешивается» и теплопроводность быстро падает пропорционально давлению, доходя до ничтожных значений по достижении высокого вакуума. На применении вакуума и основано устройство термосов. Термосы очень распространены, они применяются не только для хранения горячей и холодной пищи, но и в науке и технике. В этом случае их называют, по имени изобретателя, сосудами Дьюара. В таких сосудах (иногда их просто называют дьюарами) перевозят жидкие воздух, азот, кислород. Позже мы расскажем каким образом эти газы получаются в жидком состоянии *).

*) Всякий, кто видел баллоны из термосов, замечал, что у них всегда посеребренные стенки. А почему? Дело в том, что теплопроводность, о которой мы говорили,— не единственный способ передачи тепла. Существует еще другой способ передачи, о которой мы поговорим в другой книге,— так называемое излучение. В обычных условиях он гораздо слабее, чем теплопроводность, но все же вполне заметен. Для ослабления излучения и производится серебрение стенок термоса.

КОНВЕКЦИЯ

Но если вода такой плохой проводник тепла, то как же она нагревается в чайнике? Воздух еще хуже проводит тепло; тогда непонятно, почему во всех частях комнаты зимой устанавливается одинаковая температура.

Вода в чайнике быстро закипает из-за земного притяжения. Нижние слои воды, нагреваясь, расширяются, становятся легче и поднимаются кверху, а на их место поступает холодная вода. Быстрый нагрев происходит лишь благодаря конвекции (латинское слово, означающее «перемешивание»). Нагреть воду в чайнике, находящемся в межпланетной ракете, будет не так-то легко.

Еще об одном случае конвекции воды, не называя этого слова, мы говорили несколько раньше, объясняя, почему реки не промерзают до дна.

Почему батареи центрального отопления помещаются у пола, а форточки делаются в верхней части окна? Пожалуй, удобнее было бы открывать форточку, если бы она была внизу, а батареи, чтобы не мешались, было бы неплохо поместить под потолком.

Если бы мы послушались таких советов, то быстро бы обнаружили, что комната не прогревается батареей и не проветривается при открытой форточке.

С воздухом в комнате происходит то же самое, что и с водой в чайнике. Когда батарея центрального отопления включается, воздух в нижних слоях комнаты начинает нагреваться. Он расширяется, становится легче и поднимается кверху, к потолку. На его место приходят более тяжелые слои холодного воздуха. И они, нагревшись, уходят к потолку. Таким образом в комнате возникает непрерывное течение воздуха — теплого снизу вверх и холодного сверху вниз. Открывая форточку зимой, мы впускаем в комнату поток холодного воздуха. Он тяжелее комнатного и идет вниз, вытесняя теплый воздух, который поднимается кверху и уходит в форточку.

Керосиновая лампа хорошо разгорается лишь тогда, когда на нее надето высокое стекло. Не следует думать, что стекло нужно только для защиты пламени от ветра. И в самую тихую погоду яркость света сразу возрастает, как только на лампу надето стекло. Роль стекла состоит в том, что оно усиливает приток воздуха к пла-

мени — создает тягу. Это происходит по той причине, что воздух внутри стекла, обедненный кислородом, затраченным на горение, быстро нагревается и идет кверху, а на его место поступает чистый холодный воздух через отверстия, сделанные в горелке лампы.

Чем выше стекло, тем лампа будет лучше гореть. Действительно, быстрота, с которой устремляется холодный воздух в горелку лампы, зависит от разности в весе нагретого столба воздуха в лампе и холодного воздуха вне лампы. Чем выше столб воздуха, тем больше будет эта разность весов, а с ней и быстрота перемешивания.

Поэтому и заводские трубы делают высокими. Для заводских топок нужен особенно сильный приток воздуха, нужна хорошая тяга. Она и достигается благодаря высоким трубам.

Отсутствие конвекции в лишенной тяжести ракете не позволит пользоваться спичками, лампами и газовыми горелками: продукты сгорания задушат пламя.

Воздух — плохой проводник; при его помощи мы можем сохранять тепло, но с одним условием: если мы избежим конвекции — перемешивания теплого и холодного воздуха,— которая сводит на нет теплоизоляционные свойства воздуха.

Устранение конвекции достигается применением разного рода пористых и волокнистых тел. Внутри таких тел воздуху трудно двигаться. Все подобные тела хороши как теплоизоляторы только благодаря способности удерживать слой воздуха. Теплопроводность же самих веществ волокна или стенок пор может быть не очень малой.

Хороша шуба из густого меха, содержащего как можно больше волокон; гагачий пух позволяет изготовлять тепловые спальные мешки весом меньше полукилограмма из-за исключительной тонины своих волокон. Полкилограмма этого пуха могут «задержать» столько же воздуха, сколько десяток килограммов ватина.

Для уменьшения конвекции делают двойные рамы. Воздух между стеклами не участвует в перемешивании воздушных слоев, происходящем в комнате.

Наоборот, всякое движение воздуха усиливает перемешивание и увеличивает передачу тепла. Именно поэтому, когда нам нужно, чтобы тепло уходило по-

быстрее, мы обмахиваемся веером или включаем вентилятор. Но если температура воздуха выше температуры нашего тела, то перемешивание приведет к обратному результату, и ветер ощущается, как горячее дыхание.

Задача парового котла состоит в том, чтобы как можно быстрее получать нагретый до нужной температуры пар. Естественной конвекции в поле тяжести для этого совершенно недостаточно. Поэтому создание интенсивной циркуляции воды и пара, приводящей к перемешиванию теплых и холодных слоев, является одной из основных задач при конструировании паровых котлов.

Глава 4

СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

ЖЕЛЕЗНЫЙ ПАР И ТВЕРДЫЙ ВОЗДУХ

Не правда ли — странное сочетание слов? Однако это вовсе не чепуха: и железный пар, и твердый воздух существуют в природе, но только не при обычных условиях.

О каких же условиях идет речь? Состояние вещества определяется двумя обстоятельствами: температурой и давлением.

Наша жизнь протекает в относительно мало меняющихся условиях. Давление воздуха колеблется в пределах нескольких процентов около одной атмосферы; температура воздуха, скажем, в районе Москвы лежит в интервале от —30 до +30°С; в абсолютной шкале температур, в которой за нуль принята самая низкая возможная температура (—273°С), этот интервал будет выглядеть менее внушительно: 240—300 К, что также составляет всего ±10% от средней величины.

Вполне естественно, что мы привыкли к этим обычным условиям и поэтому, говоря простые истины вроде: «железо — твердое тело, воздух — газ» и т. д., мы забываем добавить: «при нормальных условиях».

Если нагревать железо, оно сначала расплавится, а потом испарится. Если воздух охлаждать, то он сначала превратится в жидкость, а затем затвердеет.

Даже если читатель и не встречался никогда с железным паром и твердым воздухом, он, вероятно, без труда поверит, что любое вещество изменением температуры можно получать и в твердом, и в жидком, и в газообразном состояниях, или, как еще говорят, в твердой, жидкой или газообразной фазах.

Поверить в это легко потому, что одно вещество, без которого жизнь на Земле была бы невозможной, каждый наблюдал и в виде газа, и как жидкость, и в виде твердого тела. Речь идет, конечно, о воде.

При каких же условиях происходят превращения вещества из одного состояния в другое?

КИПЕНИЕ

Если опустить термометр в воду, которая налита в чайник , включить электроплитку и следить за ртутью термометра, то мы увидим следующее: почти сразу же уровень ртути поползет кверху. Вот уже 90, 95, наконец 100°С. Вода закипает, и одновременно прекращается подъем ртути. Вода кипит уже много минут, но уровень ртути не изменяется. Пока вся вода не выкипит, температура не изменится (рис. 4.1).

На что же идет тепло, если температура воды не меняется? Ответ очевиден. Процесс превращения воды в пар требует энергии.

Сравним энергию грамма воды и грамма образовавшегося из нее пара. Молекулы пара расположены дальше одна от другой, чем молекулы воды. Понятно, что из-за этого потенциальная энергия воды будет отличаться от потенциальной энергии пара.

Потенциальная энергия притягивающихся частиц уменьшается с их сближением. Поэтому энергия пара больше энергии воды, и превращение воды в пар требует энергии. Этот избыток энергии и сообщается электроплиткой воде, кипящей в чайнике.

Энергия, нужная для превращения воды в пар, называется теплотой испарения. Для превращения

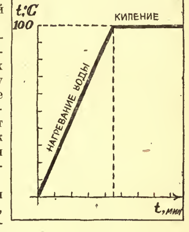


Рис. 4.1.

1 г воды в пар требуется 539 кал (это цифра для температуры 100°С).

Если 539 кал идет на 1 г, то на 1 моль воды будет затрачено $18 \cdot 539 = 9700$ кал. Такое количество тепла надо затратить на разрыв межмолекулярных связей.

Можно сравнить эту цифру с величиной работы, необходимой для разрыва внутримолекулярных связей. Для того чтобы 1 моль водяного пара расщепить на атомы, требуется около 220 000 кал, т. е. в 25 раз больше энергии. Это непосредственно доказывает слабость сил, связывающих молекулы друг с другом, по сравнению с силами, стягивающими атомы в молекулу.

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Температура кипения воды равна 100°С; можно подумать, что это неотъемлемое свойство воды, что вода, где бы и в каких условиях она ни находилась, всегда будет кипеть при 100°С.

Но это не так, и об этом прекрасно осведомлены жители высокогорных селений.

Вблизи вершины Эльбруса имеется домик для туристов и научная станция. Новички иногда удивляются, «как трудно сварить яйцо в кипятке» или «почему кипяток не обжигает». В этих условиях им указывают, что вода кипит на вершине Эльбруса уже при 82°С.

В чем же тут дело? Какой физический фактор вмешивается в явление кипения? Какое значение имеет высота над уровнем моря?

Этим физическим фактором является давление, действующее на поверхность жидкости. Не нужно забираться на вершину горы, чтобы проверить справедливость сказанного.

Помещая подогреваемую воду под колокол и накачивая или выкачивая оттуда воздух, можно убедиться, что температура кипения растет при возрастании давления и падает при его уменьшении.

Вода кипит при 100°С только при определенном давлении —760 мм рт. ст. (или 1 атм).

Кривая температуры кипения в зависимости от давления показана на рис. 4.2. На вершине Эльбруса дав-

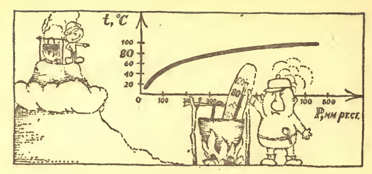


Рис. 4.2.

ление равно 0,5 атм, этому давлению и соответствует температура кипения 82°С.

А вот водой, кипящей при 10—15 мм рт. ст., можно освежиться в жаркую погоду. При этом давлении температура кипения упадет до 10—15°С.

Можно получить даже «кипяток», имеющий температуру замерзающей воды. Для этого придется снизить давление до 4,6 мм рт. ст.

Интересную картину можно наблюдать, если поместить открытый сосуд с водой под колокол и откачивать воздух. Откачка заставит воду закипеть, но кипение требует тепла. Взять его неоткуда, и воде придется отдать свою энергию. Температура кипящей воды начнет падать, но так как откачка продолжается, то падает и давление. Поэтому кипение не прекратится, вода будет продолжать охлаждаться и в конце концов замерзнет.

Такое кипение холодной воды происходит не только при откачке воздуха. Например, при вращении гребного корабельнего винта давление в быстро движущемся около металлической поверхности слое воды сильно падает и вода в этом слое закипает, т. е. в ней появляются многочисленные наполненные паром пузырьки. Это явление называется кавитацией (от латинского слова cavitas — полость).

Снижая давление, мы понижаем температуру кипения. А увеличивая его? График, подобный нашему, отвечает на этот вопрос. Давление в 15 атм может задержать кипение воды, оно начнется только при 200°С,

а давление в 80 атм заставит воду закипеть лишь при 300°C.

Итак, определенному внешнему давлению соответствует определенная температура кипения. Но это утверждение можно и «перевернуть», сказав так: каждой температуре кипения воды соответствует свое определенное давление. Это давление называется упругостью пара.

Кривая, изображающая температуру кипения в зависимости от давления, является одновременно и кривой упругости пара в зависимости от температуры.

Цифры, нанесенные на график температуры кипения (или на график упругости пара), показывают, что упругость пара меняется очень резко с изменением температуры. При 0°C (т. е. 273 K) упругость пара равна 4,6 мм рт. ст., при 100°C (373 K) она равна 760 мм рт. ст., т. е. возрастает в 165 раз. При повышении температуры вдвое (от 0°C, т. е. 273 K, до 273°C, т. е. 546 K) упругость пара возрастает с 4,6 мм рт. ст. почти до 60 атм, т. е. примерно в 10 000 раз.

Поэтому, напротив, температура кипения меняется с давлением довольно медленно. При изменении давления вдвое — от 0,5 атм до 1 атм температура кипения возрастает от 82°C (355 K) до 100°C (373 K) и при изменении вдвое от 1 до 2 атм — от 100°C (373 K) до 120°C (393 K).

Та же кривая, которую мы сейчас рассматриваем, управляет и конденсацией (сгущением) пара в воду.

Превратить пар в воду можно либо сжатием, либо охлаждением.

Как во время кипения, так и в процессе конденсации точка не сдвинется с кривой, пока превращение пара в воду или воды в пар не закончится полностью. Это можно сформулировать еще и так: в условиях нашей кривой и только при этих условиях возможно сосуществование жидкости и пара. Если при этом не подводить и не отнимать тепла, то количества пара и жидкости в закрытом сосуде будут оставаться неизменными. Про такие пар и жидкость говорят, что они находятся в равновесии, и пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным.

Кривая кипения и конденсации имеет, как мы видим, еще один смысл — это кривая равновесия жидкости и

пара. Кривая равновесия делит поле диаграммы на две части. Влево и вверх (к большим температурам и меньшим давлениям) расположена область устойчивого состояния пара. Вправо и вниз — область устойчивого состояния жидкости.

Кривая равновесия пар — жидкость, т. е. кривая зависимости температуры кипения от давления или, что то же самое, упругости пара от температуры, примерно одинакова для всех жидкостей. В одних случаях изменение может быть несколько более резким, в других — несколько более медленным, но всегда упругость пара быстро растет с увеличением температуры.

Уже много раз мы пользовались словами «газ» и «пар». Эти два слова довольно равноправны. Можно сказать: водяной газ есть пар воды, газ кислород есть пар кислородной жидкости. Все же при пользовании этими двумя словами сложилась некоторая привычка. Так как мы привыкли к определенному относительно небольшому интервалу температур, то слово «газ» мы применяем обычно к тем веществам, упругость пара которых при обычных температурах выше атмосферного давления. Напротив, о паре мы говорим, когда при комнатной температуре и давлении атмосферы вещество более устойчиво в виде жидкости.

ИСПАРЕНИЕ

Кипение — быстрый процесс, и от кипящей воды за короткий срок не остается и следа, она превращается в пар.

Но есть и другое явление превращения воды или другой жидкости в пар — это испарение. Испарение происходит при любой температуре вне зависимости от давления, которое в обычных условиях всегда близко к 760 мм рт. ст. Испарение, в отличие от кипения,— очень медленный процесс. Флакон с одеколоном, который мы забыли закрыть, окажется пустым через несколько дней; больше времени простоит блюдце с водой, но рано или поздно и оно окажется сухим.

В процессе испарения большую роль играет воздух. Сам по себе он не мешает воде испаряться. Как только мы откроем поверхность жидкости, молекулы воды нач-

нут переходить в ближайший слой воздуха. Плотность пара в этом слое будет быстро расти; через небольшой срок давление пара станет равным упругости, характерной для температуры среды. При этом упругость пара будет в точности такой же, как и при отсутствии воздуха.

Переход пара в воздух не означает, конечно, возрастания давления. Общее давление в пространстве над водяной поверхностью не возрастает, увеличивается лишь доля в этом давлении, которую берет на себя пар, и соответственно уменьшается доля воздуха, который вытесняется паром.

Над водой имеется пар, перемешанный с воздухом, выше находятся слои воздуха без пара. Они неминуемо будут перемешиваться. Водяной пар будет непрерывно переходить в более высокие слои, а на его место в нижний слой будет поступать воздух, не содержащий молекул воды. Поэтому в ближайшем к воде слое будут все время освобождаться места для новых молекул воды. Вода будет непрерывно испаряться, поддерживая давление водяного пара у поверхности равным упругости, и процесс будет продолжаться до тех пор, пока вода не испарится полностью.

Мы начали с примера с одеколоном и водой. Хорошо известно, что они испаряются с разной быстротой. Исключительно быстро улетучивается эфир, довольно быстро — спирт и много медленнее — вода. Мы сразу поймем, в чем тут дело, если найдем в справочнике значения упругости паров этих жидкостей, скажем, при комнатной температуре. Вот эти цифры: эфир —437 мм рт. ст., спирт —44,5 мм рт. ст. и вода — 17,5 мм рт. ст.

Чем больше упругость, тем больше пара в прилегающем слое воздуха и тем быстрее жидкость испаряется. Мы знаем, что упругость пара возрастает с повышением температуры. Понятно, почему скорость испарения увеличивается при нагреве.

На скорость испарения можно повлиять еще и другим способом. Если мы хотим помочь испарению, надо быстрее уводить пар от жидкости, т. е. ускорить перемешивание воздуха. Именно поэтому испарение сильно ускоряется обдуванием жидкости. Вода, хотя и обладает относительно небольшой упругостью пара,

исчезнет довольно быстро, если блюдце поставить на ветру.

Понятно поэтому, почему пловец, вышедший из воды, ощущает холод на ветру. Ветер ускоряет перемешивание воздуха с паром и, значит, убыстряет испарение, а тепло для испарения вынуждено отдать тело человека.

Самочувствие человека зависит от того, много или мало водяных паров находится в воздухе. И сухой и влажный воздух неприятны. Влажность считается нормальной, когда она равна 60%. Это значит, что плотность водяного пара составляет 60% от плотности водяного насыщенного пара при той же температуре.

Если влажный воздух охлаждать, то в конце концов давление водяных паров в нем сравняется с упругостью пара при этой температуре. Пар станет насыщенным и при дальнейшем понижении температуры начнет конденсироваться в воду. Утренняя роса, увлажняющая траву и листья, появляется как раз благодаря такому явлению.

При 20°С плотность насыщенных паров воды — около 0,00002 г/см^3. Мы будем себя хорошо чувствовать, если в воздухе находится водяных паров 60% от этого числа — значит, лишь немного более одной стотысячной доли грамма в 1 см^3.

Хоть эта цифра и мала, но для комнаты она приведет к внушительным количествам пара. Нетрудно подсчитать, что в комнате средних размеров с площадью 12 м^2 и высотой 3 м может «уместиться» в виде насыщенного пара около килограмма воды.

Значит, если плотно закрыть такую комнату и поставить открытую бочку с водой, то испарится литр воды, какова бы ни была емкость бочки.

Интересно сравнить этот результат для воды с соответствующими цифрами для ртути. При той же температуре в 20°С плотность насыщенного пара ртути — 10^{-8} г/см^3. В комнате, о которой только что шла речь, уместится не более 1 г паров ртути.

Кстати говоря, ртутные пары очень ядовиты, и 1 г ртутных паров может серьезно повредить здоровью любого человека. Работая со ртутью, надо следить, чтобы даже самая маленькая капелька ртути не пролилась.

КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Как превратить газ в жидкость? График кипения отвечает на этот вопрос. Превратить газ в жидкость можно, либо уменьшая температуру, либо увеличивая давление.

В XIX в. повышение давления представлялось задачей более легкой, чем понижение температуры. В начале этого столетия великому английскому физику Михаилу Фарадею удалось сжать газы до значений упругости паров и таким способом превратить в жидкость много газов (хлор, углекислый газ и др.).

Однако некоторые газы — водород, азот, кислород — никак не поддавались сжижению. Сколько ни увеличивали давление, они не превращались в жидкость. Можно было подумать, что кислород и другие газы не могут быть жидкими. Их причислили к истинным, или постоянным, газам.

На самом же деле неудачи были вызваны непониманием одного важного обстоятельства.

Рассмотрим жидкость и пар, находящиеся в равновесии, и подумаем, что происходит с ними при возрастании температуры кипения и, разумеется, соответствующем возрастании давления. Иначе говоря, представим себе, что точка на графике кипения движется вдоль кривой вверх. Ясно, что жидкость при повышении температуры расширяется и плотность ее падает. Что же касается пара, то увеличение температуры кипения, разумеется способствует его расширению, но, как мы уже говорили, давление насыщенного пара растет значительно быстрее, чем температура кипения. Поэтому плотность пара не падает, а, наоборот, быстро растет с увеличением температуры кипения.

Поскольку плотность жидкости падает, а плотность пара растет, то, двигаясь «вверх» по кривой кипения, мы неминуемо доберемся до такой точки, в которой плотности жидкости и пара сравняются (рис. 4.3).

В этой замечательной точке, которая называется критической, кривая кипения обрывается. Так как все различия между газом и жидкостью связаны с разницей в плотности, то в критической точке свойства жидкости и газа становятся одинаковыми. Для каждого вещества существует своя критическая температура и свое кри-

тическое давление. Так, для воды критическая точка соответствует температуре 374°C и давлению 218,5 атм.

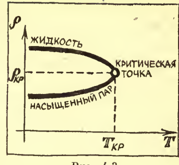


Рис. 4.3.

Если сжимать газ, температура которого ниже критической, то процесс его сжатия изобразится стрелкой, пересекающей кривую кипения (рис. 4.4). Это значит, что в момент достижения давления, равного упругости пара (точка пересечения стрелки с кривой кипения), газ начнет конденсироваться в жидкость. Если бы наш сосуд был прозрачным, то в этот момент мы увидели бы начало образования слоя жидкости на дне сосуда. При неизменном давлении слой жидкости будет расти, пока, наконец, весь газ не превратится в жидкость. Дальнейшее сжатие потребует уже увеличения давления.

Совершенно иначе обстоит дело при сжатии газа, температура которого выше критической. Процесс сжатия опять-таки можно изобразить в виде стрелки, идущей снизу вверх. Но теперь эта стрелка не пересекает кривую кипения. Значит, при сжатии пар не будет конденсироваться, а будет лишь непрерывно уплотняться.

При температуре выше критической невозможно существование жидкости и газа, поделенных границей раздела. При сжатии до любых плотностей под поршнем будет находиться однородное вещество, и трудно сказать, когда его можно назвать газом, а когда — жидкостью.

Наличие критической точки показывает, что между жидким и газообразным состоянием нет принципиального различия. На первый взгляд могло бы показаться, что такого принципиального различия нет только в том случае, когда речь идет о температурах выше критической. Это, однако, не так. Существование критической точки указывает на возможность превращения жидкости — самой настоящей жидкости, которую можно налить в стакан — в газообразное состояние без всякого подобия кипения.

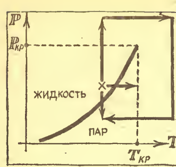


Рис. 4.4.

Такой путь превращения показан на рис. 4.4. Крестиком отмечена заведомая жидкость. Если немного понизить давление (стрелка вниз), она закипит, закипит она и в том случае, если немного повысить температуру (стрелка вправо). Но мы поступим совсем иначе. Сожмем жидкость весьма сильно, до давления выше критического. Точка, изображающая состояние жидкости, пойдет вертикально вверх. Затем подогреем жидкость — этот процесс изобразится горизонтальной линией. Теперь, после того как мы очутились правее критической температуры, понизим давление до исходного. Если теперь уменьшить температуру, то можно получить самый настоящий пар, который мог быть получен из этой жидкости более простым и коротким путем.

Таким образом, всегда возможно, изменяя давление и температуру в обход критической точки, получить пар путем непрерывного перехода его из жидкости или жидкость из пара. Такой непрерывный переход не требует кипения или конденсации.

Ранние попытки сжижения таких газов, как кислород, азот, водород, потому и были неудачны, что не было известно о существовании критической температуры. У этих газов критические температуры очень низкие: у азота —147°С, у кислорода —119°С, у водорода —240°С, или 33 К. Рекордсменом является гелий, его критическая температура равна 4,3 К. Превратить эти газы в жидкость можно лишь одним способом — надо снизить их температуру ниже указанной.

ПОЛУЧЕНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Существенного уменьшения температуры можно достигнуть разными способами. Но идея всех способов одна и та же: надо заставить тело, которое мы хотим охладить, затратить свою внутреннюю энергию.

Как же это сделать? Один из способов — заставить жидкость кипеть, не подводя тепла извне. Для этого, как мы знаем, надо уменьшить давление — свести его к значению упругости пара. Тепло, расходуемое на кипение, будет заимствовано из жидкости и температура жидкости и пара, а вместе с ней и упругость пара будут падать. Поэтому, чтобы кипение не прекращалось и происходило побыстрее, из сосуда с жидкостью надо непрерывно откачивать воздух.

Однако падению температуры при этом процессе наступает предел: упругость пара становится в конце концов совершенно незначительной, и нужное давление не смогут создать даже самые сильные откачивающие насосы.

Для того чтобы продолжить понижение температуры, можно, охлаждая газ полученной жидкостью, превратить и его в жидкость с более низкой температурой кипения. Теперь процесс откачки можно повторить со вторым веществом и таким образом получить более низкие температуры. В случае необходимости такой «каскадный» метод получения низких температур можно продлить.

Именно таким образом и поступали в конце прошлого века; сжижение газов производили ступенями: последовательно превращали в жидкость этилен, кислород, азот, водород — вещества с температурами кипения —103, —183, —196 и —253°С. Располагая жидким водородом, можно получить и самую низкокипящую жидкость — гелий (—269°С). Сосед «слева» помогал получить соседа «справа».

Каскадному методу охлаждения без малого сто лет. В 1877 г. этим методом был получен жидкий воздух. В 1884—1885 гг. впервые был получен жидкий водород. Наконец, еще через двадцать лет была взята последняя крепость: в 1908 г. Каммерлинг-Оннесом в городе Лейдене в Голландии был превращен в жидкость гелий — вещество с самой низкой критической температурой. Недавно был отмечен 70-летний юбилей этого важного научного достижения.

Долгие годы Лейденская лаборатория была единственной «низкотемпературной» лабораторией. Теперь же во всех странах существуют десятки таких лабораторий, не говоря уже о заводах, производящих жид-

кий воздух, азот, кислород и гелий для технических целей.

Каскадный метод получения низких температур теперь применяется редко. В технических установках для понижения температуры применяют другой способ понижения внутренней энергии газа: заставляют газ быстро расширяться и производить работу за счет внутренней энергии.

Если, например, сжатый до нескольких атмосфер воздух пустить в расширитель, то при совершении работы перемещения поршня или вращения турбины воздух так резко охладится, что превратится в жидкость. Углекислый газ, если его быстро выпустить из баллона, так резко охлаждается, что на лету превращается в «лед».

Жидкие газы находят широкое применение в технике. Жидкий кислород употребляется во взрывной технике, как компонент топливной смеси в реактивных двигателях.

Сжижение воздуха используется в технике для разделения составляющих воздух газов.

Температура жидкого воздуха широко используется в различных областях техники. Но для многих физических исследований эта температура недостаточно низка. Действительно, если перевести градусы Цельсия в абсолютную шкалу, то мы увидим, что температура жидкого воздуха — это примерно 1/3 от комнатной температуры. Гораздо более интересны для физики «водородные» температуры, т. е. температуры порядка 14—20 K, и в особенности «гелиевые» температуры. Самая низкая температура, получающаяся при откачке жидкого гелия, это 0,7 K.

Физикам удалось и гораздо ближе подойти к абсолютному нулю. В настоящее время получены температуры, превышающие абсолютный нуль всего лишь на несколько тысячных долей градуса. Однако эти сверхнизкие температуры получают способами, не похожими на те, что мы описали выше.

В последние годы физика низких температур породила специальную отрасль промышленности, занятую производством аппаратуры, позволяющей поддерживать при температуре близкой к абсолютному нулю большие объемы и длинные провода.

ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫЙ ПАР И ПЕРЕГРЕТАЯ ЖИДКОСТЬ

При переходе температуры кипения пар должен конденсироваться, превращаться в жидкость. Однако, оказывается, если пар не соприкасается с жидкостью и если пар очень чистый, то удается получить переохлажденный или пересыщенный пар — пар, которому давно следовало бы уже стать жидкостью.

Пересыщенный пар очень неустойчив. Иногда достаточно толчка или брошенной в пространстве пара крупинки, чтобы запоздавшая конденсация началась немедленно.

Опыт показывает, что сгущение молекул пара резко облегчается внесением в пар мелких инородных частиц. В пыльном воздухе пересыщение водяного пара не происходит. Можно вызвать конденсацию клубами дыма. Ведь дым состоит из мелких твердых частичек. Попадая в пар, эти частички собирают около себя молекулы, становятся центрами конденсации.

Итак, хотя и неустойчиво, пар может существовать в области температур, приспособленной для «жизни» жидкости.

А может ли жидкость на тех же условиях «жить» в области пара? Иначе говоря, можно ли перегреть жидкость?

Оказывается, можно. Для этого нужно добиться, чтобы молекулы жидкости не отрывались от ее поверхности. Радикальное средство — ликвидировать свободную поверхность, т. е. поместить жидкость в такой сосуд, где она была бы сжата со всех сторон твердыми стенками. Таким способом удается достигнуть перегрева порядка нескольких градусов, т. е. увести точку, изображающую состояние жидкостей, вправо от кривой кипения (рис. 4.4).

Перегрев — это сдвиг жидкости в область пара, поэтому перегрева жидкости можно добиться как подводом тепла, так и уменьшением давления.

Последним способом можно добиться удивительного результата. Вода или другая жидкость, тщательно освобожденная от растворенных газов (это нелегко сделать), помещается в сосуд с поршнем, доходящим до поверхности жидкости. Сосуд и поршень должны

смачиваться жидкостью. Если теперь тянуть поршень на себя, то вода, сцепленная с дном поршня, последует за ним. Но слой воды, уцепившийся за поршень, потянет за собой следующий слой воды, этот слой потянет нижележащий,— в результате жидкость растянется.

В конце концов столб воды разорвется (именно столб воды, а не вода оторвется от поршня), но произойдет это тогда, когда сила на единицу площади дойдет до десятков килограммов. Другими словами, в жидкости создается отрицательное давление в десятки атмосфер.

Уже при малых положительных давлениях устойчивым является парообразное состояние вещества. А жидкость можно довести до отрицательного давления. Более яркого приме[а «перегрева» не придумаешь.

ПЛАВЛЕНИЕ

Нет такого твердого тела, которое сколько угодно противостояло бы повышению температуры. Рано или поздно твердый кусочек превращается в жидкость; правда, в некоторых случаях нам не удастся добраться до температуры плавления — может произойти химическое разложение.

По мере возрастания температуры молекулы движутся все интенсивнее. Наконец, наступает такой момент, когда поддержание порядка среди сильно «раскачавшихся» молекул становится невозможным. Твердое тело плавится. Самой высокой температурой плавления обладает вольфрам: 3380°С. Золото плавится при 1063°С, железо — при 1539°С. Впрочем, есть и легкоплавкие металлы. Ртуть, как хорошо известно, плавится уже при температуре —39°С. Органические вещества не имеют высоких температур плавления. Нафталин плавится при 80°С, толуол — при —94,5°С.

Измерить температуру плавления тела, в особенности если оно плавится в интервале температур, которые измеряют обычным термометром, совсем нетрудно. Совсем не обязательно следить глазами за плавящимся телом. Достаточно смотреть на ртутный столбик термометра. Пока плавление не началось температура тела растет (рис. 4.5). Как только плавление начи-

нается, повышение температуры прекращается, и температура останется неизменной, пока процесс плавления не закончится полностью.

Как и превращение жидкости в пар, превращение твердого тела в жидкость требует тепла. Необходимая для этого теплота называется скрытой теплотой плавления. Например, плавление одного килограмма льда требует 80 ккал.

T

$T_{пл}$

ПЛАВЛЕНИЕ

НАГРЕВАНИЕ КРИСТАЛЛА

t, мин

Рис. 4.5.

Лед относится к числу тел, обладающих большой теплотой плавления. Плавление льда требует, например, в 10 раз больше энергии, чем плавление такой же массы свинца. Разумеется, речь идет о самом плавлении, мы здесь не говорим, что до начала плавления свинца его надо нагреть до +327°С. Из-за большой теплоты плавления льда замедляется таяние снега. Представьте себе, что теплота плавления была бы в 10 раз меньше. Тогда весенние паводки приводили бы ежегодно к невообразимым бедствиям.

Итак, теплота плавления льда велика, но она же и мала, если ее сравнить с удельной теплотой парообразования в 540 ккал/кг (в семь раз меньше). Впрочем, это различие совершенно естественно. Переводя жидкость в пар, мы должны оторвать молекулы одну от другой, а при плавлении нам приходится лишь разрушить порядок в расположении молекул, оставив их почти на тех же расстояниях. Ясно, что во втором случае требуется меньше работы.

Наличие определенной точки плавления есть важный признак кристаллических веществ. Именно по этому признаку их легко отличить от других твердых тел, называемых аморфными или стеклами. Стекла встречаются как среди неорганических, так и среди органических веществ. Оконные стекла делаются обычно из силикатов натрия и кальция; на письменный стол кладут часто органическое стекло (его называют еще плексиглас).

Аморфные вещества в противоположность кристаллам не имеют определенной температуры плавления. Стекло не плавится, а размягчается. При нагревании кусок стекла сначала становится из твердого мягким, его легко можно гнуть или растягивать; при более высокой температуре кусок начинает изменять свою форму под действием собственной тяжести. По мере нагревания густая вязкая масса стекла принимает форму того сосуда, в котором оно лежит. Эта масса сначала густа, как мед, потом — как сметана и, наконец, становится почти такой же маловязкой жидкостью, как вода. При всем желании мы не можем здесь указать определенной температуры перехода твердого тела в жидкое. Причины этого лежат в коренном отличии строения стекла от строения кристаллических тел. Как говорилось выше, атомы в аморфных телах расположены беспорядочно. Стекла по строению напоминают жидкости. Уже в твердом стекле молекулы расположены беспорядочно. Значит, повышение температуры стекла лишь увеличивает размах колебаний его молекул, дает им постепенно все бо́льшую и бо́льшую свободу перемещения. Поэтому стекло размягчается постепенно и не обнаруживает резкого перехода «твердое» — «жидкое», характерного для перехода от расположения молекул в строгом порядке к беспорядочному расположению.

Когда речь шла о кривой кипения, мы рассказали, что жидкость и пар могут, хотя и в неустойчивом состоянии, жить в чужих областях — пар можно переохладить и перевести влево от кривой кипения, жидкость — перегреть и оттянуть вправо от этой кривой.

Возможны ли аналогичные явления в случае кристалла с жидкостью? Оказывается, аналогия тут неполная.

Если нагреть кристалл, то он начнет плавиться при своей температуре плавления. Перегреть кристалл не удастся. Напротив, охлаждая жидкость, можно, если принять некоторые меры, сравнительно легко «проскочить» температуру плавления. В некоторых жидкостях удается достигнуть больших переохлаждений. Есть даже такие жидкости, которые легко переохладить, а трудно заставить кристаллизоваться. По мере охлаждения такой жидкости она становится все более

вязкой и наконец затвердевает, не кристаллизуясь. Таково стекло.

Можно переохладить и воду. Капельки тумана могут не замерзать даже при сильных морозах. Если в переохлажденную жидкость бросить кристаллик вещества — затравку, то немедленно начнется кристаллизация.

Наконец, во многих случаях задержавшаяся кристаллизация может начаться от встряски или от других случайных событий. Известно, например, что кристаллический глицерин был впервые получен при транспортировке по железной дороге. Стекла после долгого стояния могут начать кристаллизоваться (расстекловываться, или «зарухать», как говорят в технике).

КАК ВЫРАСТИТЬ КРИСТАЛЛ?

Почти любое вещество может при известных условиях дать кристаллы. Кристаллы можно получить из раствора или из расплава данного вещества, а также из его паров (например, черные ромбовидные кристаллы иода легко выпадают из его паров при нормальном давлении без промежуточного перехода в жидкое состояние).

Начните растворять в воде столовую соль или сахар. При комнатной температуре (20°C) вы сумеете растворить в граненом стакане только 70 г соли. Дальнейшие добавки соли растворяться не будут и улягутся на дне в виде осадка. Раствор, в котором дальнейшего растворения уже не происходит, называется насыщенным. Если изменить температуру, то изменится и степень растворимости вещества. Всем хорошо известно, что большинство веществ горячая вода растворяет значительно легче, чем холодная.

Представьте себе теперь, что вы приготовили насыщенный раствор, скажем, сахара при температуре 30°C и начинаете охлаждать его до 20°C. При 30°C вы смогли растворить в 100 г воды 223 г сахара, при 20°C растворяется 205 г. Тогда при охлаждении от 30 до 20°C 18 г окажутся «лишними» и, как говорят, выпадут из раствора. Итак, один из возможных способов получения

кристаллов состоит в охлаждении насыщенного раствора.

Можно поступить и иначе. Приготовьте насыщенный раствор соли и оставьте его в открытом стакане. Через некоторое время вы обнаружите появление кристалликов. Почему они образовались? Внимательное наблюдение покажет, что одновременно с образованием кристаллов произошло еще одно изменение — уменьшилось количество воды. Вода испарилась, и в растворе оказалось «лишнее» вещество. Итак, другой возможный способ образования кристаллов — это испарение раствора.

Как же происходит образование кристаллов из раствора?

Мы сказали, что кристаллы «выпадают» из раствора; надо ли это понимать так, что неделю кристалла не было, а в одно какое-то мгновение он сразу вдруг возник? Нет, дело обстоит не так: кристаллы растут. Не удается, разумеется, обнаружить глазом самые начальные моменты роста. Сначала немногие из беспорядочно движущихся молекул или атомов растворенного вещества собираются в том примерно порядке, который нужен для образования кристаллической решетки. Такую группу атомов или молекул называют зародышем.

Опыт показывает, что зародыши чаще образуются при наличии в растворе каких-либо посторонних мельчайших пылинок. Всего быстрее и легче кристаллизация начинается тогда, когда в насыщенный раствор помещается маленький кристалл-затравка. При этом выделение из раствора твердого вещества будет заключаться не в образовании новых кристалликов, а в росте затравки.

Рост зародыша не отличается, конечно, от роста затравки. Смысл использования затравки состоит в том, что она «оттягивает» на себя выделяющееся вещество и препятствует, таким образом, одновременному образованию большого числа зародышей. Если же зародышей образуется много, то они будут мешать друг другу при росте и не позволят нам получить крупные кристаллы.

Как распределяются на поверхности зародыша порции атомов или молекул, выделяющихся из раствора?

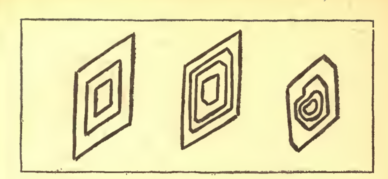


Рис. 4.6.

Опыт показывает, что рост зародыша или затравки заключается как бы в перемещении граней параллельно самим себе в направлении, перпендикулярном к грани. При этом углы между гранями остаются постоянными (мы уже знаем, что постоянство углов — важнейший признак кристалла, вытекающий из его решетчатого строения).

На рис. 4.6 даны встречающиеся очертания трех кристаллов одного и того же вещества при их росте. Подобные картины можно наблюдать в микроскоп. В случае, изображенном слева, число граней во время роста сохраняется. Средний рисунок дает пример появления новой грани (вверху справа) и снова ее исчезновения.

Очень важно отметить, что скорость роста граней, т. е. скорость перемещения их параллельно самим себе, неодинакова у разных граней. При этом «зарастают» — исчезают именно те грани, которые перемещаются всего быстрее, например левая нижняя грань на среднем рисунке. Наоборот, медленно растущие грани оказываются самыми широкими, как говорят, наиболее развитыми.

Особенно отчетливо это видно на последнем рисунке. Бесформенный обломок приобретает ту же форму, что и другие кристаллы, именно из-за анизотропии скорости роста. Вполне определенные грани развиваются за счет других всего сильнее и придают кристаллу форму, свойственную всем образцам этого вещества.

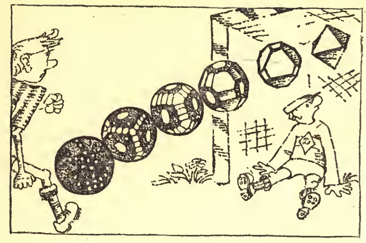


Рис. 4.7.

Очень красивые переходные формы наблюдаются в том случае, когда в качестве затравки берется шар, а раствор попеременно слегка охлаждается и нагревается. При нагревании раствор становится ненасыщенным, и идет частичное растворение затравки. Охлаждение ведет к насыщению раствора и росту затравки. Но молекулы оседают при этом по-иному, как бы отдавая предпочтение некоторым местам. Вещество, таким образом, переносится с одних мест шара на другие.

Сначала на поверхности шара появляются маленькие грани в форме кружков. Кружки постепенно увеличиваются и, соприкасаясь друг с другом, сливаются по прямым ребрам. Шар превращается в многогранник. Затем одни грани обгоняют другие, часть граней зарастает, и кристалл приобретает свойственную ему форму (рис. 4.7).

При наблюдении за ростом кристаллов поражает основная особенность роста — параллельное перемещение граней. Получается так, что выделяющееся вещество застраивает грань слоями: пока один слой не достроен, следующий строиться не начинает.

На рис. 4.8 показана «недостроенная» упаковка атомов. В каком из обозначенных буквами положений

прочнее всего будет удерживаться новый атом, пристроившись к кристаллу? Без сомнения, в *А*, так как здесь он испытывает притяжение соседей с трех сторон, тогда как в *Б* — с двух, а в *В* — только с одной стороны. Поэтому сначала достраивается столбик, затем вся плоскость и только потом начинается укладка новой плоскости.

В целом ряде случаев кристаллы образуются из расплавленной массы — из расплава. В природе это совершается в огромных масштабах: из огненной магмы возникли базальты, граниты и многие другие горные породы.

Начнем нагревать какое-нибудь кристаллическое вещество, например каменную соль. До 804°С кристаллики каменной соли будут мало изменяться: они лишь незначительно расширяются, и вещество остается твердым. Измеритель температуры, помещенный в сосуд с веществом, показывает непрерывный рост температуры при нагревании. При 804°С мы обнаружим сразу два новых, связанных между собой явления: вещество начнет плавиться, и подъем температуры приостановится. Пока все вещество не превратится в жидкость, температура не изменится; дальнейший подъем температуры — это уже нагревание жидкости. Все кристаллические вещества имеют определенную температуру плавления. Лед плавится при 0°С, железо — при 1527°С, ртуть — при 39°С и т. д.

Как мы уже знаем, в каждом кристаллике атомы или молекулы вещества образуют упорядоченную

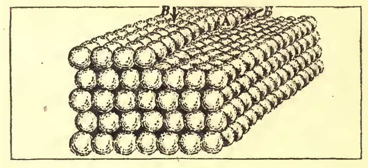


Рис. 4.8.

упаковку и совершают малые колебания около своих средних положений. По мере нагревания тела скорость колеблющихся частиц возрастает вместе с размахом колебаний. Это увеличение скорости движения частиц с возрастанием температуры составляет один из основных законов природы, который относится к веществу в любом состоянии — твердом, жидком или газообразном.

Когда достигнута определенная, достаточно высокая температура кристалла, колебания его частиц становятся столь энергичными, что аккуратное расположение частиц становится невозможным — кристалл плавится. С началом плавления подводимое тепло идет уже не на увеличение скорости частиц, а на разрушение кристаллической решетки. Поэтому подъем температуры приостанавливается. Последующее нагревание — это увеличение скорости частиц жидкости.

В интересующем нас случае кристаллизации из расплава вышеописанные явления наблюдаются в обратном порядке: по мере охлаждения жидкости ее частицы замедляют свое хаотическое движение; при достижении определенной, достаточно низкой температуры скорость частиц уже столь мала, что некоторые из них под действием сил притяжения начинают пристраиваться одна к другой, образуя кристаллические зародыши. Пока все вещество не закристаллизуется, температура остается постоянной. Эта температура, как правило, та же, что и температура плавления.

Если не принимать специальных мер, то кристаллизация из расплава начнется сразу во многих местах. Кристаллики будут расти в виде правильных, свойственных им многогранников совершенно так же, как мы это описывали выше. Однако свободный рост продолжается недолго: увеличиваясь, кристаллики наталкиваются друг на друга, в местах соприкосновения рост прекращается, и затвердевшее тело получает зернистое строение. Каждое зерно — это отдельный кристаллик, которому не удалось принять своей правильной формы.

В зависимости от многих условий, и прежде всего от быстроты охлаждения, твердое тело может обладать более или менее крупными зернами: чем медленнее охлаждение, тем крупнее зерна. Размеры зерен крис-

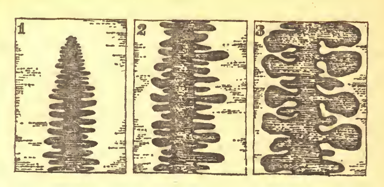


Рис. 4.9.

таллических тел колеблются от миллионной доли сантиметра до нескольких миллиметров. В большинстве случаев зернистое кристаллическое строение можно наблюдать в микроскоп. Твердые тела обычно имеют именно такое мелкокристаллическое строение.

Для техники представляет очень большой интерес процесс застывания металлов. События, происходящие при литье и при застывании металла в формах, физики исследовали чрезвычайно детально.

Большей частью при затвердевании растут древоподобные монокристаллики, носящие название дендритов. В иных случаях дендриты ориентированны как попало, в других случаях — параллельно друг другу.

На рис. 4.9 показаны стадии роста одного дендрита. При таком поведении дендрит может зарасти прежде, чем он встретится с другим аналогичным. Тогда в отливке мы не найдем дендритов. События могут развиваться и иначе: дендриты могут встретиться и прорастать друг в друга (ветки одного в промежутки между ветками другого), пока они еще «молоды».

Таким образом, могут возникнуть отливки, зерна которых (показанные на рис. 2.22) обладают самой различной структурой. А от характера этой структуры существенно зависят свойства металлов. Управлять поведением металла при затвердевании можно, меняя скорость охлаждения и систему отвода тепла.

Теперь поговорим о том, как вырастить крупный одиночный кристалл. Ясно, что требуется принять

меры к тому, чтобы кристалл рос из одного места. А если уж начало расти несколько кристалликов, то во всяком случае надо сделать так, чтобы условия роста были благоприятны лишь для одного из них.

Вот, например, как поступают при выращивании кристаллов легкоплавких металлов. Металл расплавляют в стеклянной пробирке с оттянутым концом. Пробирку, подвешанную за нить внутри вертикальной цилиндрической печи, медленно опускают вниз. Оттянутый конец постепенно выходит иэ печи и охлаждается. Начинается кристаллизация. Сначала образуется несколько кристалликов, но те, которые растут вбок, упираются в стенку пробирки и рост их замедляется. В благоприятных условиях окажется лишь тот кристаллик, который растет вдоль оси пробирки, т. е. в глубь расплава. По мере опускания пробирки новые порции расплава, попадающие в область низких температур, будут «питать» этот единственный кристалл. Поэтому из всех кристалликов выживает он один; по мере опускания пробирки он продолжает расти вдоль ее оси. В конце концов весь расплавленный металл застывает в виде одиночного кристалла.

Та же идея лежит в основе выращивания тугоплавких кристаллов рубина. Мелкий порошок вещества сыплют струей через пламя. Порошинки при этом плавятся; крошечные капли падают на тугоплавкую подставку очень малой площади, образуя множество кристалликов. При дальнейшем падении капель на подставку все кристаллики растут, но опять-таки вырастает лишь тот из них, который находится в наиболее выгодном положении для «приема» падающих капель.

Для чего же нужны крупные кристаллы?

В крупных одиночных кристаллах часто нуждаются промышленность и наука. Большое значение для техники имеют кристаллы сегнетовой соли и кварца, обладающие замечательным свойством преобразовывать механические действия (например, давление) в электрическое напряжение.

Оптическая промышленность нуждается в крупных кристаллах кальцита, каменной соли, флюорита и др.

Для часовой промышленности нужны кристаллы рубинов, сапфиров и некоторых других драгоценных камней. Дело в том, что отдельные подвижные части

обыкновенных часов делают в час до 20 000 колебаний. Такая большая скорость предъявляет необычайно высокие требования к качеству кончиков осей и подшипников. Истирание будет наименьшим, когда подшипником для кончика оси диаметром 0,07—0,15 мм служит рубин или сапфир. Искусственные кристаллы этих веществ очень прочны и очень мало истираются сталью. Замечательно, что искусственные камни оказываются при этом лучше таких же природных камней.

Однако наибольшее значение для промышленности имеет выращивание монокристаллов полупроводников (кремния). Без этих кристаллов немыслима современная радиоэлектроника.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПЛАВЛЕНИЯ

Если изменить давление, то изменится и температура плавления. С такой же закономерностью мы встречались когда говорили о кипении. Чем больше давление, тем выше температура кипения. Как правило, это верно и для плавления. Однако имеется небольшое число веществ, которые ведут себя аномально: их температура плавления уменьшается с увеличением давления.

Дело в том, что подавляющее большинство твердых тел плотнее своих жидкостей. Исключение из этого правила составляют как раз те вещества, температура, плавления которых изменяется при изменении давления не совсем обычно — например, вода. Лед легче воды, и температура плавления льда понижается при возрастании давления.

Сжатие способствует образованию более плотного состояния. Если твердое тело плотнее жидкого, то сжатие помогает затвердеванию и мешает плавлению. Но если плавление затрудняется сжатием, то это значит, что вещество остается твердым, тогда как раньше при этой температуре оно уже плавилось бы, т. е. при увеличении давления температура плавления растет. В аномальном случае жидкость плотнее твердого тела, и давление помогает образованию жидкости, т. е. понижает температуру плавления.

Влияние давления на температуру плавления много меньше аналогичного эффекта для кипения. Увеличение давления более чем на 100 кгс/см² понижает температуру плавления льда на 1°С.

Почему же коньки скользят только по льду, но не по столь же гладкому паркету? Видимо, единственное объяснение — это образование воды, которая смазывает конек. Чтобы понять возникшее противоречие, нужно вспомнить следующее: тупые коньки скользят по льду очень плохо. Коньки надо заточить, чтобы они резали лед. В этом случае на лед давит лишь острие кромки конька. Давления на лед достигают десятков тысяч атмосфер, лед все-таки плавится.

ИСПАРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Когда говорят «вещество испаряется», то обычно подразумевают, что испаряется жидкость. Но твердые тела тоже могут испаряться. Иногда испарение твердых тел называют возгонкой.

Испаряющимся твердым телом является, например, нафталин. Нафталин плавится при 80°С, а испаряется при комнатной температуре. Именно это свойство нафталина и позволяет применять его для истребления моли. Меховая шуба, засыпанная нафталином, пропитывается парами нафталина и создает атмосферу, которую моль не выносит. Всякое пахнущее твердое вещество возгоняется в значительной степени. Ведь запах создается молекулами, оторвавшимися от вещества и достигшими нашего носа. Однако более часты случаи, когда вещество возгоняется в незначительной степени, иногда в такой, которая не может быть обнаружена даже очень тщательными исследованиями. В принципе любое твердое вещество (именно любое, даже железо или медь) испаряется. Если мы не обнаруживаем возгонки, то это значит лишь, что плотность насыщающего пара очень незначительна.

Плотность насыщенного пара, находящегося в равновесии с твердым телом, быстро растет с увеличением температуры (рис. 4.10). Можно убедиться в том, что ряд веществ, имеющих острый запах при комнатной температуре, теряет его при низкой.

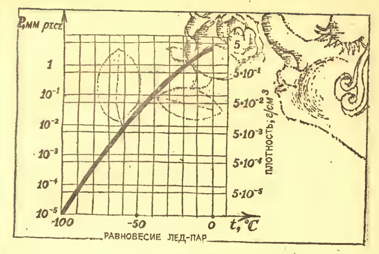


Рис. 4.10.

Существенно увеличить плотность насыщенного пара твердого тела в большинстве случаев нельзя по простой причине — вещество раньше расплавится.

Испаряется и лед. Это хорошо знают домашние хозяйки, которые в морозы вывешивают сушить мокрое белье. Вода сначала замерзает, а затем лед испаряется, и белье оказывается сухим.

ТРОЙНАЯ ТОЧКА

Итак, имеются условия, при которых пар, жидкость и кристалл могут попарно существовать в равновесии.

Могут ли находиться в равновесии все состояния? Такая точка на диаграмме давление — температура существует, ее называют тройной. Где она находится?

Если поместить в закрытый сосуд при нуле градусов воду с плавающим льдом, то в свободное пространство начнут поступать водяные (и «ледяные») пары. При давлении 4,6 мм рт. ст. испарение прекратится, и начнется насыщение. Теперь три фазы — лед, вода и пар — будут в состоянии равновесия. Это и есть тройная точка.

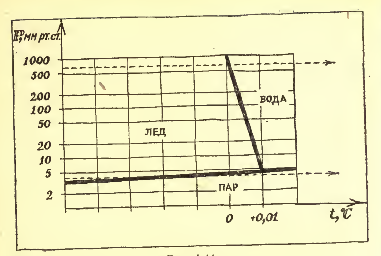


Рис. 4.11.

Соотношения между различными состояниями наглядно и отчетливо показывает диаграмма для воды, изображенная на рис. 4.11.

Такую диаграмму можно построить для любого тела.

Кривые на рисунке нам знакомы — это кривые равновесия между льдом и паром, льдом и водой, водой и паром. По вертикали, как обычно, откладывается давление, по горизонтали — температура.

Три кривые пересекаются в тройной точке и делят диаграмму на три области — жизненные пространства льда, воды и водяного пара.

Диаграмма состояния — это сжатый справочник. Ее цель — дать ответ на вопрос, какое состояние тела устойчиво при таком-то давлении и такой-то температуре.

Если в условия «левой области» поместить воду или пар, то они станут льдом. Если в «нижнюю область» внести жидкость или твердое тело, то получится пар. В «правой области» пар будет конденсироваться, а лед плавиться.

Диаграмма существования фаз позволяет сразу же ответить, что произойдет с веществом при нагревании или при сжатии. Нагревание при неизменном давле-

нии изобразится на диаграмме горизонтальной линией. Вдоль этой линии слева направо движется точка, изображающая состояние тела.

На рисунке изображены две такие линии, одна из них — это нагревание при нормальном давлении. Линия лежит выше тройной точки. Поэтому она пересечет сначала кривую плавления, а затем, за пределами чертежа, и кривую испарения. Лед при нормальном давлении расплавится при температуре 0°С, а образовавшаяся вода закипит при 100°С.

Рис. 4.12.

Иначе будет обстоять дело для льда, нагреваемого при очень небольшом давлении, скажем, чуть ниже 5 мм рт. ст. Процесс нагревания изобразится линией, идущей ниже тройной точки. Кривые плавления и кипения не пересекаются этой линией. При таком незначительном давлении нагревание приведет к непосредственному переходу льда в пар.

На рис. 4.12 эта же диаграмма показывает, какое интересное явление произойдет при сжатии водяного пара в состоянии, помеченном на рисунке крестиком. Сначала пар превратится в лед, а затем расплавится. Рисунок позволяет тут же сказать, при каком давлении начнется рост кристалла и когда произойдет плавление.

Диаграммы состояния всех веществ похожи одна на другую. Большие, с житейской точки зрения, различия возникают из-за того, что место нахождения тройной точки на диаграмме может быть у разных веществ самым различным.

Ведь мы существуем вблизи «нормальных условий», т. е. прежде всего при давлении, близком к одной атмосфере. Как расположена тройная точка вещества по отношению к линии нормального давления — для нас очень существенно.

Если давление в тройной точке меньше атмосферного, то для нас, живущих в «нормальных» условиях,

вещество относится к плавящимся. При повышении температуры оно сначала превращается в жидкость, а потом закипает.

В обратном случае — когда давление в тройной точке выше атмосферного — мы при нагревании не увидим жидкости, твердое вещество будет прямо превращаться в пар. Так ведет себя «сухой лед», что очень удобно для продавцов мороженого. Брикеты мороженого можно перекладывать кусками «сухого льда» и не бояться при этом, что мороженое станет мокрым. «Сухой лед» — это твердый углекислый газ CO_2. Тройная точка этого вещества лежит при 73 атм. Поэтому при нагревании твердого CO_2 точка, изображающая его состояние, движется по горизонтали, пересекающей только лишь кривую испарения твердого тела (так же, как и для обычного льда при давлении около 5 мм рт. ст.).

Мы уже рассказали читателю, каким образом определяется один градус температуры по шкале Кельвина, или, как требует сейчас говорить, система СИ — один кельвин. Однако речь шла о принципе определения температуры. Не все институты метрологии обладают идеальными газовыми термометрами. Поэтому шкалу температуры строят с помощью фиксированных природой точек равновесия между разными состояниями вещества.

Особую роль при этом играет тройная точка воды. Градус Кельвина определяют сейчас, как 273,16-ю часть термодинамической температуры тройной точки воды. Тройная точка кислорода принята равной 54,361 К. Температура затвердевания золота положена равной 1337,58 К. Пользуясь этими реперными точками, можно точно отградуировать любой термометр.

ОДНИ И ТЕ ЖЕ АТОМЫ, НО... РАЗНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Черный матовый мягкий графит, которым мы пишем, и блестящий прозрачный, твердый, режущий стекло алмаз построены из одних и тех же атомов углерода. Почему же так различны свойства этих двух одинаковых по составу веществ?

Вспомните решетку слоистого графита, каждый атом которого имеет трех ближайших соседей, и решетку алмаза, атом которого имеет четырех ближайших соседей. На этом примере отчетливо видно, как определяются свойства кристаллов взаимным расположением атомов. Из графита делают огнеупорные тигли, выдерживающие температуру до двух-трех тысяч градусов, а алмаз горит при температуре выше 700°С; удельный вес алмаза 3,5, а графита — 2,3; графит проводит электрический ток, алмаз — не проводит, и т. д.

Этой особенностью давать разные кристаллы обладает не только углерод. Почти каждый химический элемент, и не только элемент, но и любое химическое вещество, может существовать в нескольких разновидностях. Известно шесть разновидностей льда, девять разновидностей серы, четыре разновидности железа.

Обсуждая диаграмму состояния, мы не говорили о разных типах кристаллов и нарисовали единую область твердого тела. А эта область для очень многих веществ делится на участки, каждый из которых соответствует определенному «сорту» твердого тела или, как говорят, определенной твердой фазе (определенной кристаллической модификации).

Каждая кристаллическая фаза имеет свою область устойчивого состояния, ограниченную определенным интервалом давлений и температур. Законы превращения одной кристаллической разновидности в другую — такие же, как законы плавления и испарения.

Для каждого давления можно указать температуру, при которой оба типа кристаллов будут мирно сосуществовать. Если повысить температуру, кристалл одного вида будет превращаться в кристалл второго вида. Если понизить температуру, то произойдет обратное превращение.

Чтобы при нормальном давлении красная сера превратилась в желтую, нужна температура ниже 110°С. Выше этой температуры, вплоть до точки плавления, устойчив порядок расположения атомов, свойственный красной сере. Температура падает,— колебания атомов уменьшаются, и, начиная со 110°С, природа находит более удобный порядок расположения ато-

мов. Происходит превращение одного кристалла в другой.

Шести разным льдам никто не придумывал названия. Так и говорят: лед один, лед два, ..., лед семь. Как же семь, если всего шесть разновидностей? Дело в том, что лед четыре при повторных опытах не обнаружен.

Если сжимать воду при температуре около нуля, то при давлении около 2000 атм образуется лед пять, а при давлении около 6000 атм — лед шесть.

Лед два и лед три устойчивы при температурах ниже нуля градусов.

Лед семь — горячий лед; он возникает при сжатии горячей воды до давлений около 20 000 атм.

Все льды, кроме обычного, тяжелее воды. Лед, получающийся при нормальных условиях, ведет себя аномально; наоборот, лед, полученный при условиях, отличных от нормы, ведет себя нормально.

Мы говорим, что каждой кристаллической модификации свойственна определенная область существования. Но если так, то каким же образом существуют при одинаковых условиях графит и алмаз?

Такое «беззаконие» в мире кристаллов встречается очень часто. Умение жить в «чужих» условиях для кристаллов является почти правилом. Если для перевода пара или жидкости в чужие области существования приходится прибегать к различным ухищрениям, то кристалл, напротив, почти никогда не удается заставить остаться в границах, отведенных ему природой.

Перегревы и переохлаждения кристаллов объясняются трудностью преобразования одного порядка в другой в условиях крайней тесноты. Желтая сера должна при 95,5°С превращаться в красную. При более или менее быстром нагревании мы «проскочим» эту точку превращения и доведем температуру плавления серы до 113°С.

Истинную температуру превращения проще всего обнаружить при соприкосновении кристалликов. Если их тесно наложить один на другой и поддерживать температуру 96°С, то желтый будет съеден красным, а при 95°С желтый поглотит красный. В отличие от перехода «кристалл $\rightleftarrows$ жидкость» превращения «крис-

талл — кристалл» задерживаются обычно как при переохлаждении, так и при перегреве.

В некоторых случаях мы имеем дело с такими состояниями вещества, которым бы полагалось жить совсем при других температурах.

Белое олово должно превратиться в серое при падении температуры до +13°С. Мы обычно имеем дело с белым оловом и знаем, что зимой с ним ничего не делается. Оно превосходно выдерживает переохлаждения в 20—30 градусов. Однако в условиях суровой зимы белое олово превращается в серое. Незнание этого факта было одним из обстоятельств, погубивших экспедицию Скотта на Южный полюс (1912 г.). Жидкое топливо, взятое экспедицией, находилось в сосудах, паянных оловом. При больших холодах белое олово превратилось в серый порошок — сосуды распаялись, и топливо вылилось. Недаром появление серых пятен на белом олове называют оловянной чумой.

Так же, как и в случае серы, белое олово может быть превращено в серое при температуре чуть ниже 13°С, если только на оловянный предмет попадет крошечная крупинка серой разновидности.

Существование нескольких разновидностей одного и того же вещества и задержки в их взаимных превращениях имеют огромное значение для техники.

При комнатной температуре атомы железа образуют кубическую объемноцентрированную решетку, в которой атомы занимают места по вершинам и в центре куба. Каждый атом имеет 8 соседей. При высокой температуре атомы железа образуют более плотную «упаковку» — каждый атом имеет 12 соседей. Железо с числом соседей 8 — мягкое, железо с числом соседей 12 — твердое. Оказывается, можно получить железо второго типа при комнатной температуре. Этот способ — закалка — широко применяется в металлургии.

Производится закалка весьма просто — металлический предмет раскаляют докрасна, а затем бросают в воду или в масло. Охлаждение происходит так быстро, что превращение структуры, устойчивой при высокой температуре, не успевает произойти. Таким образом, высокотемпературная структура будет неограниченно долго существовать в несвойственных ей условиях: перекристаллизация в устойчивую структуру

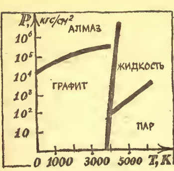


Рис. 4.13.

идет настолько медленно, что практически не заметна.

Говоря о закалке железа, мы были не вполне точны. Закаляют сталь, т. е. железо, содержащую доли процента углерода. Наличие совсем малых примесей углерода задерживает превращение твердого железа в мягкое и позволяет производить закалку. Что же касается совсем чистого железа, то его закалить не удается — превращение структуры успевает произойти даже при самом резком охлаждении.

В зависимости от вида диаграммы состояния, меняя давление или температуру, достигают тех или иных превращений.

Многие превращения кристалла в кристалл наблюдаются при изменении одного лишь давления. Таким способом был получен черный фосфор.

Превратить графит в алмаз удалось, лишь используя одновременно и высокую температуру, и большое давление. На рис. 4.13 показана диаграмма состояния углерода. При давлениях ниже десяти тысяч атмосфер и при температурах меньше 4000 K устойчивой модификацией является графит. Таким образом, алмаз живет в «чужих» условиях, поэтому его без особого труда можно превратить в графит. Но практический интерес представляет обратная задача. Осуществить превращение графита в алмаз не удается одним лишь повышением давления. Фазовое превращение в твердом состоянии идет, видимо, чересчур медленно. Вид диаграммы состояния подсказывает правильное решение: увеличить давление и одновременно нагреть. Тогда мы получим (правый угол диаграммы) расплавленный углерод. Охлаждая его при высоком давлении, мы должны попасть в область алмаза.

Практическая возможность подобного процесса была доказана в 1955 г., а в настоящее время проблема считается технически решенной.

УДИВИТЕЛЬНАЯ ЖИДКОСТЬ

Если понижать температуру тела, то рано или поздно оно затвердеет и приобретет кристаллическую структуру. При этом безразлично, при каком давлении происходит охлаждение. Это обстоятельство кажется совершенно естественным и понятным с точки зрения законов физики, с которыми мы уже познакомились. Действительно, понижая температуру, мы уменьшаем интенсивность теплового движения. Когда движение молекул станет настолько слабым, что уже перестанет мешать силам взаимодействия между ними, молекулы выстроятся в аккуратном порядке — образуют кристалл. Дальнейшее охлаждение заберет от молекул всю энергию их движения, и при абсолютном нуле вещество должно существовать в виде покоящихся молекул, расположенных в правильную решетку.

Опыт показывает, что таким образом ведут себя все вещества. Все, кроме одного-единственного: таким «уродом» является гелий.

Некоторые сведения о гелии мы уже сообщили читателю. Гелий является рекордсменом по значению своей критической температуры. Ни одно вещество не имеет критической температуры более низкой, чем 4,3 К. Однако сам по себе этот рекорд не означает чего-либо удивительного. Поразительно другое: охлаждая гелий ниже критической температуры, добравшись практически до абсолютного нуля, мы не получим твердого гелия. Гелий остается жидким и при абсолютном нуле.

Поведение гелия совершенно не объяснимо с точки зрения изложенных нами законов движения и является одним из признаков ограниченной годности таких законов природы, которые казались универсальными.

Если тело жидкое, то его атомы находятся в движении. Но ведь, охладив тело до абсолютного нуля, мы отняли у него всю энергию движения. Приходится признать, что у гелия имеется такая энергия движения, которая не может быть отнята. Это заключение несовместимо с механикой, которой мы занимались до сих пор. Согласно этой изученной нами механике, движение тела всегда можно затормозить до полной останов-



Рис. 4.14.

ки, отняв у него всю кинетическую энергию; также точно можно прекратить движение молекул, отобрав у них энергию при столкновении со стенками охлаждаемого сосуда. Для гелия такая механика явно не подходит.

«Странное» поведение гелия является указанием на факт огромной важности. Мы впервые встретились с невозможностью применения в мире атомов основных законов механики, установленных непосредственным изучением движения видимых тел,— законов, казавшихся незыблемым фундаментом физики.

Тот факт, что при абсолютном нуле гелий «отказывается» кристаллизоваться, никаким способом нельзя примирить с механикой, которую мы изучали до сих пор. Противоречие, с которым мы встретились впервые,— неподчинение мира атомов законам механики — лишь первое звено в цепи еще более острых и резких противоречий в физике.

Эти противоречия приводят к необходимости пересмотра основ механики атомного мира. Пересмотр этот очень глубок и приводит к изменению всего нашего понимания природы.

Необходимость коренного пересмотра механики атомного мира не означает, что надо поставить крест на изученных нами законах механики. Было бы несправедливо заставлять читателя изучать ненужные вещи. Старая механика полностью справедлива в мире больших тел. Уже и этого достаточно для того, чтобы относиться к соответствующим главам физики с полным уважением. Однако важно и то, что ряд законов «старой» механики переходит без изменения в «новую» механику. Сюда относится, в частности, закон сохранения энергии.

Наличие «неотнимаемой» при абсолютном нуле энергии не является особым свойством гелия. Оказывается, «нулевая» энергия имеется у всех веществ.

Только у гелия этой энергии оказывается достаточно для того, чтобы помешать атомам образовать правильную кристаллическую решетку.

Не надо думать, что гелий не может находиться в кристаллическом состоянии. Для кристаллизации гелия надо лишь повысить давление примерно до 25 атм. Охлаждение, проводимое выше этого давления, приведет к образованию твердого кристаллического гелия с совершенно обычными свойствами. Гелий образует кубическую гранецентрированную решетку.

На рис. 4.14 показана диаграмма состояния гелия. Она резко отличается от диаграмм всех остальных веществ отсутствием тройной точки. Кривые плавления и кипения не пересекаются.

Глава 5

РАСТВОРЫ

ЧТО ТАКОЕ РАСТВОР?

Если посолить бульон и размешать ложкой, то не останется и следов соли. Не следует думать, что крупинок соли просто не видно невооруженным глазом. Кристаллики соли никаким способом не удастся обнаружить по той причине, что они растворились. Если подбавить в бульон перца, то раствора не получится. Можно перемешивать бульон хоть сутками — крошечные черные крупинки не исчезнут.

Но что значит — «вещество растворилось»? Ведь атомы или молекулы, из которого оно построено, не могут пропасть бесследно? Конечно, нет, они и не пропадают. При растворении исчезает лишь крупинка вещества, кристаллик, скопление молекул одного сорта. Растворение состоит в таком перемешивании частиц смеси, при котором молекулы одного вещества распределяются между молекулами другого. Раствор — это смесь молекул или атомов разных веществ.

Раствор может содержать различные количества растворенного вещества. Состав раствора характеризуется его концентрацией, например, отношением числа граммов растворенного вещества к числу литров раствора.

По мере добавления растворяемого вещества концентрация раствора растет, но не беспредельно. Рано или поздно раствор становится насыщенным и перестает «принимать в себя» растворяемое вещество. Концентрация насыщенного раствора, т. е. «предельная» концентрация раствора, называется растворимостью.

Удивительно много сахара можно растворить в горячей воде. При температуре 80°С полный стакан воды примет без остатка 720 г сахара. Этот насыщенный раствор будет густым и вязким, повара называют его сахарным сиропом. Мы привели для сахара цифру для граненого стакана, емкость которого 0,2 л. Значит, концентрация сахара в воде при 80°С равняется 3600 г/л (читается: «грамм на литр»).

Растворимость некоторых веществ сильно зависит от температуры. При комнатной температуре (20°С) растворимость сахара в воде падает до 2000 г/л. Напротив, растворимость соли совершенно незначительно меняется с изменением температуры.

Сахар и соль хорошо растворяются в воде. А вот нафталин в воде практически нерастворим. Различные вещества в различных растворителях растворяются совершенно различно.

Растворами пользуются для выращивания монокристаллов. Если подвесить в насыщенный раствор маленький кристаллик растворенного вещества, то по мере испарения растворителя растворенное вещество будет высаживаться на поверхности этого кристаллика. При этом молекулы будут соблюдать строгий порядок и в результате маленький кристаллик превратится в большой, оставаясь монокристаллом.

РАСТВОРЫ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Можно ли растворить жидкость в жидкости? Разумеется, можно. Например, водка — это раствор спирта в воде (или, если угодно, воды в спирте,— смотря чего больше). Водка—настоящий раствор, молекулы воды и спирта полностью перемешаны в ней.

Однако не всегда при смешении двух жидкостей получится такой результат.

Попробуйте подлить к воде керосин. Никаким перемешиванием не удастся получить однородный раствор, это так же безнадежно, как растворять перец в супе. Как только перемешивание прекращается, жидкости располагаются слоями: более тяжелая вода — внизу, более легкий керосин — наверху. Керосин с

водой и спирт с водой — системы, противоположные по свойствам растворимости.

Однако имеются и промежуточные случаи. Если смешать эфир с водой, то мы отчетливо увидим в сосуде два слоя. На первый взгляд может показаться, что сверху эфир, а внизу вода. На самом же деле и нижний и верхний слои являются растворами: внизу — вода, в которой растворилась часть эфира (концентрация 25 г эфира на литр воды), а наверху — эфир, в котором имеется заметное количество воды (60 г/л).

Теперь поинтересуемся растворами газов. Ясно, что все газы растворяются друг в друге в неограниченных количествах. Два газа всегда перемешиваются так, что молекулы одного проникают между молекулами другого. Ведь молекулы газов мало взаимодействуют друг с другом, и каждый газ ведет себя в присутствии другого газа, в некотором смысле не обращая «внимания» на своего сожителя.

Газы могут растворяться и в жидкостях. Однако уже не в любых количествах, а в ограниченных, не отличаясь в этом отношении от твердых веществ. При этом разные газы растворяются по-разному, и различия эти могут быть очень большими. В воде можно растворить огромные количества аммиака (на полстакана холодной воды — около 100 г), большие количества сероводорода и углекислоты. В незначительном количестве растворим в воде кислород и азот (0,07 и 0,03 г на литр холодной воды). Таким образом, в литре холодной воды находится всего лишь около сотой грамма воздуха. Однако и это маленькое количество играет большую роль в жизни на Земле — ведь растворенным в воде кислородом воздуха дышат рыбы.

Чем больше давление газа, тем больше его растворится в жидкости. Если количество растворенного газа не очень велико, то между ним и давлением газа над поверхностью жидкости имеется прямая пропорциональность.

Кто не получал удовольствия от холодной газированной воды, так хорошо утоляющей жажду! Получение газированной воды возможно благодаря зависимости количества растворенного газа от давления. Углекислый газ загоняют в воду под давлением (из баллонов, которые имеются у каждого киоска, где про-

дают газированную воду). Когда воду наливают в стакан, давление падает до атмосферного и вода выделяет «лишний» газ в виде пузырьков.

Учитывая подобные эффекты, водолазов нельзя быстро поднимать из воды на поверхность. Под большим давлением на глубине в крови водолаза растворяется дополнительное количество воздуха. При подъеме давление падает, воздух начинает выделяться в виде пузырьков и может закупорить кровеносные сосуды.

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ

В жизни слово «раствор» применяют к жидкостям. Однако существуют и твердые смеси, атомы или молекулы которых однородно перемешаны. Но как получить твердые растворы? При помощи пестика и ступки их не получишь. Поэтому смешивающиеся вещества надо сначала сделать жидкими, т. е. расплавить, потом смешать жидкости и дать смеси затвердеть. Можно поступить и иначе — растворить два вещества, которые мы хотим смешать, в какой-либо жидкости, а затем уже выпарить растворитель. Такими способами могут получиться твердые растворы. Могут получиться, но обычно не получаются. Твердые растворы — это редкость. Если в соленую воду бросить кусок сахара, он превосходно растворится. Выпарим воду; на дне чашки обнаружатся мельчайшие кристаллики соли и сахара. Соль с сахаром не дают твердых растворов.

Можно расплавить в одном тигле кадмий с висмутом. После охлаждения мы увидим в микроскоп смесь кристалликов кадмия и висмута. Висмут и кадмий тоже не образуют твердых растворов.

Необходимым, хотя и не достаточным, условием возникновения твердых растворов является близость молекул или атомов смешивающихся веществ по форме и размерам. В этом случае при замерзании смеси образуется один сорт кристалликов. Узлы решетки каждого кристалла обычно беспорядочно заселены атомами (молекулами) разных сортов.

Сплавы металлов, имеющие большое техническое значение, зачастую представляют собой твердые растворы. Растворением небольшого количества примеси

можно резко изменить свойства металла. Яркой иллюстрацией этого является получение одного из наиболее распространенных в технике материалов — стали, представляющей собой твердый раствор малых количеств углерода — порядка 0,5 весового процента (один атом углерода на 40 атомов железа) — в железе, причем атомы углерода беспорядочно внедрены между атомами железа.

В железе растворяется лишь небольшое число атомов углерода. Однако некоторые твердые растворы образуются при смешении веществ в любых пропорциях. Примером может служить сплав золото — медь. Кристаллы золота и меди имеют решетку одинакового типа — кубическую гранецентрированную. Такую же решетку имеет сплав меди с золотом. Представление о структуре сплава со все увеличивающейся долей меди мы получим, если будем мысленно удалять из решетки атомы золота и заменять их атомами меди. При этом замена происходит беспорядочно, атомы меди распределяются в общем как попало по узлам решетки. Сплавы меди с золотом можно назвать растворами замещения, а сталь является раствором иного типа — раствором внедрения.

В подавляющем же большинстве случаев твердых растворов не возникает, и, как говорилось выше, после застывания мы можем увидеть в микроскоп, что вещество состоит из смеси мелких кристалликов обоих веществ.

КАК ЗАМЕРЗАЮТ РАСТВОРЫ?

Если охладить раствор какой-либо соли в воде, то обнаружится, что температура замерзания понизилась. Нуль градусов пройден, а затвердевание не происходит. Только при температуре на несколько градусов ниже нуля в жидкости появятся кристаллики. Это кристаллики чистого льда, в твердом льде соль не растворяется.

Температура замерзания зависит от концентрации раствора. Увеличивая концентрацию раствора, мы будем уменьшать температуру кристаллизации. Самую низкую температуру замерзания имеет насыщен-

ный раствор. Понижение температуры замерзания раствора совсем не малое: так, насыщенный раствор поваренной соли в воде замерзнет при —21°С. При помощи других солей можно добиться еще большего понижения температуры; хлористый кальций, например, позволяет довести температуру затвердевания раствора до —55°С.

Рассмотрим теперь, как идет процесс замерзания. После того как из раствора выпадут первые кристаллики льда, крепость раствора увеличится. Теперь относительное число чужих молекул возрастет, помехи процессу кристаллизации воды также увеличатся, и температура замерзания упадет. Если не понижать температуру далее, то кристаллизация остановится.

При дальнейшем понижении температуры кристаллики воды (растворителя) продолжают выделяться. Наконец, раствор становится насыщенным. Дальнейшее обогащение раствора растворенным веществом становится невозможным, и раствор застывает сразу, причем если рассмотреть в микроскоп замерзшую смесь, то можно увидеть, что она состоит из кристалликов льда и кристалликов соли.

Таким образом, раствор замерзает не так, как простая жидкость. Процесс замерзания растягивается на большой температурный интервал.

Что получится, если посыпать какую-нибудь обледеневшую поверхность солью? Ответ на вопрос хорошо известен дворникам — как только соль придет в соприкосновение со льдом, лед начнет таять. Чтобы явление имело место, нужно, конечно, чтобы температура замерзания насыщенного раствора соли была ниже температуры воздуха. Если это условие выполнено, то смесь лед — соль находится в чужой области состояния, а именно в области устойчивого существования раствора. Поэтому смесь льда с солью и будет превращаться в раствор, т. е. лед будет плавиться, а соль растворяться в образующейся воде. В конце концов либо весь лед растает, либо образуется раствор такой концентрации, температура замерзания которого равна температуре среды.

Площадь дворика в 100 $м^2$ покрыта ледяной коркой в 1 см — это уже не мало льда, около 1 т. Подсчи-

таем, сколько соли нужно для очистки двора, если температура —3°С. Такой температурой кристаллизации (таяния) обладает раствор соли с концентрацией 45 г/л. Примерно 1 л воды соответствует 1 кг льда. Значит, для таяния 1 т льда при —3°С нужно 45 кг соли. Практически пользуются гораздо меньшими количествами, так как не добиваются полного таяния всего льда.

При смешении льда с солью лед плавится, а соль растворяется в воде. Но на плавление нужно тепло, и лед забирает его у своего окружения. Таким образом, добавление соли ко льду приводит к понижению температуры.

Мы привыкли сейчас покупать фабричное мороженое. Раньше мороженое готовили дома, и при этом роль холодильника играла смесь льда с солью.

КИПЕНИЕ РАСТВОРОВ

Явление кипения растворов имеет много общего с явлением замерзания.

Наличие растворенного вещества затрудняет кристаллизацию. По тем же самым причинам растворенное вещество затрудняет и кипение. В обоих случаях чужие молекулы как бы борются за сохранение как можно более разбавленного раствора. Иными словами, чужие молекулы стабилизируют состояние основного вещества (т. е. способствуют его существованию), которое может их растворить.

Поэтому чужие молекулы мешают жидкости кристаллизоваться, а значит, понижают температуру кристаллизации. Точно так же чужие молекулы мешают жидкости кипеть, а значит, повышают ее температуру кипения.

Любопытно, что до известных пределов концентрации (для не очень крепких растворов) как понижение температуры кристаллизации раствора, так и повышение температуры кипения нисколько не зависят от свойств растворенного вещества, а определяются лишь количеством его молекул. Это интересное обстоятельство используется для определения молекулярной

массы растворяемого вещества. Делается это при помощи замечательной формулы (мы не можем здесь привести ее), которая связывает изменение температуры замерзания или кипения с количеством молекул в единице объема раствора (и с теплотой плавления или кипения).

Температура кипения воды повышается раза в три меньше, чем понижается температура ее замерзания. Так, морская вода, содержащая примерно 3,5% солей, имеет точку кипения 100,6°C, в то время как температура ее замерзания понижается на 2°C.

Если одна жидкость кипит при более высокой температуре, чем другая, то (при той же температуре) упругость ее пара меньше. Значит, упругость пара раствора меньше упругости пара чистого растворителя.

О различии можно судить по следующим цифрам: упругость водяного пара при 20°C равна 17,5 мм рт. ст., упругость пара насыщенного раствора поваренной соли при той же температуре — 13,2 мм рт. ст.

Пар с упругостью 15 мм рт. ст., ненасыщенный для воды, будет пересыщен для насыщенного раствора соли. В присутствии такого раствора пар начнет конденсироваться и переходить в раствор. Разумеется, забирать водяной пар из воздуха будет не только раствор соли, но и соль в порошке. Ведь первая же капелька воды, выпавшая на соль, растворит ее и создаст насыщенный раствор.

Всасывание солью водяного пара из воздуха приводит к тому, что соль становится сырой. Это хорошо знакомо хозяйкам и доставляет им огорчения. Но это явление понижения упругости пара над раствором приносит и пользу: оно используется для сушки воздуха в лабораторной практике. Воздух пропускают через хлористый кальций, который является рекордсменом по забиранию влаги из воздуха. Если у насыщенного раствора поваренной соли упругость пара 13,2 мм рт. ст., то у хлористого кальция она 5,6 мм рт. ст. До такого значения упадет упругость водяного пара при пропускании его через достаточное количество хлористого кальция (1 кг которого «вмещает» в себя примерно 1 кг воды). Это ничтожная влажность, и воздух может считаться сухим.

КАК ОЧИЩАЮТ ЖИДКОСТИ ОТ ПРИМЕСЕЙ?

Одним из важнейших способов очистки жидкостей от примесей является перегонка. Жидкость кипятят и направляют пар в холодильник. При охлаждении пар опять превращается в жидкость, но эта жидкость будет чище исходной.

При помощи перегонки легко избавиться от твердых веществ, растворенных в жидкости. Молекулы таких веществ практически отсутствуют в паре. Этим способом получают дистиллированную воду — совершенно безвкусную чистую воду, лишенную минеральных примесей.

Однако используя испарение, можно избавиться и от жидких примесей и разделить смесь, состоящую из двух или более жидкостей. При этом пользуются тем, что две жидкости, образующие смесь, кипят не одинаково.

Посмотрим, как будет себя вести при кипении смесь двух жидкостей, например смесь воды и этилового спирта, взятых в равных пропорциях (50-градусная водка).

При нормальном давлении вода закипает при 100°С, а спирт при 78°С. Смесь, о которой идет речь, закипит при промежуточной температуре, равной 81,2°С. Спирт кипит легче, поэтому упругость его пара больше, и при исходном пятидесятипроцентном составе смеси первая порция пара будет содержать 80% спирта.

Полученную порцию пара можно отвести в холодильник и получить жидкость, обогащенную спиртом. Далее этот процесс можно повторять. Однако ясно, что практику такой способ не устроит — ведь с каждой последующей перегонкой будет получаться все меньше вещества. Чтобы такой потери не было, для целей очистки применяются так называемые ректификационные (т. е. очистительные) колонки.

Идея устройства этого интересного аппарата заключается в следующем. Представим себе вертикальную колонку, в нижней части которой находится жидкая смесь. К низу колонки подводится тепло, вверху производится охлаждение. Пар, образующийся при кипении, поднимается кверху и конденсируется; образовавшаяся жидкость стекает вниз. При неизмен-

ном подводе тепла к низу и отводе тепла сверху в закрытой колонке установятся встречные потоки пара, идущего кверху, и жидкости, стекающей вниз.

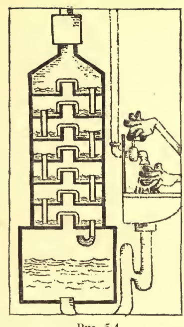
Остановим свое внимание на каком-либо горизонтальном сечении колонки. Через это сечение жидкость проходит вниз, а пар поднимается, при этом ни одно из веществ, входящих в состав жидкой смеси, не задерживается. Если речь идет о колонке, заполненной смесью спирта и воды, то количество спирта, проходящего вниз и вверх, так же как количество воды, проходящей вниз и вверх, будут равны. Так как вниз идет жидкость, а вверх пар, то это значит, что на любой высоте колонки состав жидкости и состав пара одинаковы.

Как только что было выяснено, равновесие жидкости и пара смеси двух веществ требует, напротив, разного состава жидкой и парообразной фаз. Поэтому на любой высоте колонки происходит превращение жидкости в пар и пара в жидкость. При этом конденсируется высококипящая часть смеси, а из жидкости в пар переходит низкокипящая составляющая.

Поэтому идущий вверх поток пара будет как бы забирать со всех высот низкокипящую составляющую, а стекающий вниз поток жидкости будет непрерывно обогащаться высококипящей частью. Состав смеси на каждой высоте установится различный: чем выше, тем больше процент низкокипящей составляющей. В идеале наверху будет слой чистой низкокипящей составляющей, а внизу — слой чистой высококипящей.

Теперь надо, только по возможности медленно, чтобы не нарушить обрисованной идеальной картины, отбирать вещества, низкокипящее — сверху, а высококипящее — снизу.

Для того чтобы практически осуществить разделение, или ректификацию, надо дать возможность встречным потокам пара и жидкости как следует перемешиваться. Для этой цели потоки жидкости и пара задерживают при помощи тарелок, расположенных одна над другой и сообщающихся сливными трубками. С переполненной тарелки жидкость может стекать на нижние ступеньки. Пар, идущий вверх быстрым потоком (0,3—1 м/с), прорывается через тонкий слой жидкости. Схема колонки показана на рис. 5.1.


Рис. 5.1.

Не всегда удается очистить жидкость полностью. Некоторые смеси обладают «неприятным» свойством: при определенном составе смеси соотношение компонент испаряющихся молекул такое же, что и соотношение компонент в жидкой смеси. В этом случае, разумеется, дальнейшая очистка описанным способом становится невозможной. Такова смесь, содержащая 96% спирта и 4% воды: она дает пар такого же состава. Поэтому 96%-ный спирт — самый лучший, который можно получить методом испарения.

Ректификация (или дистилляция) жидкостей является важнейшим процессом в химической технологии. При помощи ректификации добывают, например, бензин из нефти.

Любопытно, что ректификация является наиболее дешевым способом получения кислорода. Для этого, разумеется, надо предварительно перевести воздух в жидкое состояние, после чего можно ректификацией разделить его на почти чистые азот и кислород.

ОЧИСТКА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

На склянке с химическим веществом, как правило, можно увидеть рядом с химическим названием такие буквы: «ч.», «ч. д. а.» или «сп. ч.». Этими буквами условно отмечают степень чистоты вещества: «ч.» означает весьма небольшую степень чистоты — в веществе, возможно, есть примеси порядка 1%; «ч. д. а.» — вещество «чистое для анализа» — содержит не более нескольких десятых процента примесей; «сп. ч.» — спек-

трально чистое вещество — получить нелегко, спектральный анализ обнаруживает тысячные доли примеси. Надпись «сп. ч.» позволяет надеяться, что вещество по своей чистоте характеризуется по крайней мере «четырьмя девятками», т. е. что содержание основного вещества не менее 99,99%.

Потребность в чистых твердых веществах весьма велика. Для многих физических свойств вредны тысячные доли процента примесей, а в одной специальной задаче, чрезвычайно интересующей современную технику, а именно в задаче получения полупроводниковых материалов, техники требуют чистоты в семь девяток. Это значит, что решению инженерных задач мешает один ненужный атом на десять миллионов нужных! Для получения таких сверхчистых материалов прибегают к специальным методам.

Сверхчистые германий и кремний (это и есть главные представители полупроводниковых материалов) можно получить медленным вытягиванием растущего кристалла из расплава. К поверхности расплавленного кремния (или германия) подводят стержень, на конце которого укреплен затравочный кристалл. Затем начинают медленно поднимать стержень; вылезающий из расплава кристалл образуется атомами основного вещества, атомы примеси остаются в расплаве.

Более широкое применение получил метод так называемой зонной плавки. Из очищаемого элемента приготовляется пруток произвольной длины диаметром в несколько миллиметров. Вдоль прутка перемещается охватывающая его маленькая цилиндрическая печь. Температура печи достаточна для плавления, и участок металла, находящийся внутри печи, плавится. Таким образом, вдоль стержня передвигается маленькая зона расплавленного металла.

Атомы примеси обычно значительно легче растворяются в жидкости, чем в твердом теле. Поэтому на границе расплавленной зоны атомы примеси из твердых участков переходят в расплавленную зону и не переходят обратно. Передвигающаяся расплавленная зона как бы тащит атомы примеси вместе с расплавом. При обратном ходе печь выключается и операция протаскивания расплавленной зоны через пруток металла многократно повторяется. После достаточного числа

циклов остается лишь отпилить загрязненный конец прутка. Сверхчистые материалы получают в вакууме или в атмосфере инертного газа.

При большой доле чужих атомов очистку производят другими методами, зонную плавку и вытягивание кристалла из расплава применяют лишь для окончательной очистки материала.

АДСОРБЦИЯ

Газы редко растворяются в твердых телах, т. е. редко проникают внутрь кристаллов. Зато существует иной способ поглощения газов твердыми телами. Молекулы газа скапливаются на поверхности твердого тела — это своеобразное прилипание называется адсорбцией *). Итак, адсорбция происходит тогда, когда молекула не может проникнуть внутрь тела, но зато успешно цепляется за его поверхность.

Адсорбироваться — это значит поглощаться поверхностью. Но разве может такое явление играть сколько-нибудь значительную роль? Ведь слой толщиной в одну молекулу, нанесенный на самый крупный предмет, будет весить ничтожные доли грамма.

Подсчитаем. Площадь небольшой молекулы — что-нибудь около 10 $Å^2$, т. е. 10^{-15} $см^2$. Значит, на 1 $см^2$ уместится 10^{15} молекул. Такое количество молекул, скажем, воды весит немного, $3 \cdot 10^{-8}$ г. Даже на квадратном метре разместится всего 0,0003 г воды.

Заметные количества вещества образуются на поверхностях в сотни квадратных метров. На 100 $м^2$ приходится уже 0,03 г воды (10^{21} молекул).

Но разве мы сталкиваемся с такими значительными поверхностями в лабораторной практике? Однако нетрудно сообразить, что иногда совсем маленькие тела, умещающиеся на конце чайной ложечки, имеют огромные поверхности в сотни квадратных метров.

Кубик со стороной в 1 см имеет площадь поверхности 6 $см^2$. Разрежем кубик на 8 равных кубиков со сторо-

*) Не следует путать адсорбцию с абсорбцией, которая означает просто поглощение.

ной 0,5 см. Маленькие кубики имеют грани площадью 0,25 $см^2$. Всего таких граней $6 \times 8 = 48$. Их общая площадь равна 12 $см^2$. Поверхность удвоилась.

Итак, всякое раздробление тела увеличивает его поверхность. Раздробим теперь кубик со стороной 1 см на частички размером в 1 микрометр: 1 мкм $= 10^{-4}$ см, значит, большой кубок разобьется на 10^{12} частиц. Каждая частичка (для простоты допустим, что и она кубическая) имеет площадь 6 $мкм^2$, т. е. $6 \cdot 10^{-8}$ $см^2$. Общая площадь частиц равна $6 \cdot 10^4$ $см^2$, т. е. 6 $м^2$. А дробление до микрометра совсем не является пределом.

Вполне понятно, что удельная поверхность (т. е. поверхность одного грамма вещества) может выражаться огромными цифрами. Она быстро растет по мере измельчения вещества — ведь поверхность зернышка уменьшается пропорционально квадрату размера, а число зерен в единице объема растет пропорционально кубу размера. Грамм воды, налитой на дно стакана, имеет поверхность в несколько квадратных сантиметров. Тот же грамм воды в виде дождевых капель уже будет иметь поверхность, измеряемую десятками квадратных сантиметров. А один грамм капелек тумана имеет поверхность в несколько сот квадратных метров.

Если раздробить уголь (чем мельче, тем лучше), то он способен адсорбировать аммиак, углекислоту, многие ядовитые газы. Это последнее свойство обеспечило углю применение в противогазе. Уголь дробится особенно хорошо, и линейные размеры его частиц могут быть доведены до десятка ангстрем. Поэтому один грамм специального угля имеет поверхность в несколько сот квадратных метров. Противогаз с углем способен поглотить десятки литров газа.

Адсорбция широко используется в химической промышленности. Молекулы различных газов, адсорбируясь на поверхности, приходят в тесное соприкосновение одна с другой и легче вступают в химические реакции.

Для ускорения химических процессов часто используют как уголь, так и мелко раздробленные металлы — никель, медь и другие.

Вещества, ускоряющие химическую реакцию, называются катализаторами.

ОСМОС

Среди животных тканей есть своеобразные пленки, которые обладают способностью пропускать через себя молекулы воды, оставаясь непроницаемыми для молекул растворенных в воде веществ.

Свойства этих пленок являются причиной физических явлений, носящих название осмотических (или просто осмоса).

Представьте себе, что такая полупроницаемая перегородка делит на две части трубку, изготовленную в форме перевернутой буквы П. В одно колено трубки наливается раствор; а в другое колено — вода или другой растворитель. Налив в оба колена одинаковое количество жидкостей, мы с удивлением установим, что при равенстве уровней равновесия нет. Через короткое время жидкости устанавливаются на разных уровнях. При этом повышается уровень в том колене, где находится раствор. Вода, отделенная от раствора полупроницаемой перегородкой, стремится разбавить раствор. Это явление и носит название осмоса, а разность высот называется осмотическим давлением.

В чем же причина, вызывающая осмотическое давление? В правом колене сосуда (рис. 5.2) давление осуществляется одной лишь водой. В левом колене полное давление складывается из давления воды и давления растворенного вещества. Но сообщение открыто только для воды, и равновесие при наличии полупроницаемой перегородки устанавливается не тогда, когда давление слева равно полному давлению справа, а тогда, когда давление чистой воды равно «водяной» доле давления раствора. Возникающая разница полных давлений равна давлению растворенного вещества.

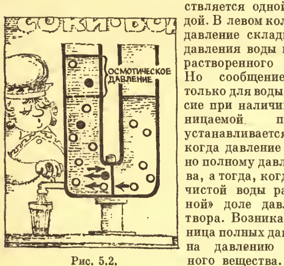


Рис. 5.2.

Этот избыток давления и есть осмотическое давление. Как показывают опыты и расчет, осмотическое давление равняется давлению газа, состоящего из растворенного вещества, занимающего тот же объем. Неудивительно поэтому, что осмотическое давление измеряется внушительными числами. Осмотическое давление, возникающее в 1 л воды при растворении 20 г сахара уравновесило бы столб воды высотой в 14 м.

Рискуя возбудить у читателя неприятные воспоминания, разберем теперь, как связано с осмотическим давлением слабительное действие растворов некоторых солей. Стенки кишечника полупроницаемы для ряда растворов. Если соль через стенки кишечника не проходит (такова глауберова соль), то в кишечнике возникает осмотическое давление, которое отсасывает воду через ткани из организма в кишечник.

Почему очень соленая вода не утоляет жажды? Оказывается, и в этом виновато осмотическое давление. Почки не могут выделять мочу с осмотическим давлением, которое больше, чем давление в тканях организма. Поэтому организм, получивший соленую морскую воду, не только не отдает ее тканевым жидкостям, но, напротив, выделяет с мочой воду, отнятую у тканей.

Глава 6

МОЛЕКУЛЯРНАЯ МЕХАНИКА

СИЛЫ ТРЕНИЯ

Мы не в первый раз говорим о трении. И правда, как можно было, рассказывая о движении, обойтись без упоминания о трении? Почти любое движение окружающих нас тел сопровождается трением. Останавливается автомобиль, у которого водитель выключил мотор, останавливается после многих колебаний маятник, медленно погружается в банку с подсолнечным маслом брошенный туда маленький металлический шарик. Что заставляет тела, движущиеся по поверхности, останавливаться, в чем причина медленного падения шарика в масле? Мы отвечаем: это силы трения, возникающие при движении одних тел вдоль поверхности других.

Но силы трения возникают не только при движении.

Вам, наверное, приходилось передвигать мебель в комнате. Вы знаете, как трудно сдвинуть с места тяжелый шкаф. Сила, противодействующая этому усилию, называется силой трения покоя.

Силы трения возникают и когда мы двигаем предмет, и когда мы катим его. Это два несколько отличных физических явления. Поэтому различают трение скольжения и трение качения. Трение качения в десятки раз меньше трения скольжения.

Конечно, в некоторых случаях и скольжение происходит с большой легкостью. Санки легко скользят по снегу, а коньки по льду — и еще легче.

От каких же причин зависят силы трения?

Сила трения между твердыми телами мало зависит от скорости движения и пропорциональна весу тела.

Если вес тела возрастет вдвое, то сдвинуть его с места и тащить будет вдвое труднее. Мы выразились не вполне точно, важен не столько вес, сколько сила, прижимающая тело к поверхности. Если тело легкое, но мы крепко надавили на него рукой, то, конечно, это скажется на силе трения. Если обозначить силу, прижимающую тело к поверхности (большей частью это вес), через P, то для силы трения $F_{тр}$ будет справедлива такая простая формула:

$$F_{тр} = kP.$$

А как же учитываются свойства поверхностей? Ведь хорошо известно, что одни и те же сани, на тех же полозьях скользят совсем по-разному, смотря по тому, обиты полозья железом или нет. Эти свойства учитываются коэффициентом пропорциональности k. Он называется коэффициентом трения.

Коэффициент трения металла по дереву равен $^1/_2$. Сдвинуть лежащую на деревянном гладком столе металлическую плиту массой в 2 кг удастся лишь силой в 1 кгс.

А вот коэффициент трения стали по льду равен всего лишь 0,027. Ту же плиту, лежащую на льду, удастся сдвинуть силой, равной всего лишь 0,054 кгс.

Одна из ранних попыток снизить коэффициент трения скольжения изображена на фрагменте росписи в Египетской гробнице, датируемом приблизительно 1650 г. до н. э. (рис. 6.1). Раб льет масло под полозья саней, везущих большую статую.

Площадь поверхности не входит в приведенную формулу: сила трения не зависит от площади поверхности соприкосновения трущихся тел. Нужна одинаковая сила, чтобы сдвинуть с места или тащить с неизменной скоростью широкий лист стали весом в килограмм и килограммовую гирю, опирающуюся на поверхность лишь малой площадью.

И еще одно замечание о силах трения при скольжении. Сдвинуть тело с места несколько труднее, чем тащить: сила трения, преодолеваемая в первое мгновение движения (трение покоя), больше последующих значений силы трения на 20—30%.

Что можно сказать о силе трения при качении, например для колеса? Как и трение скольжения, она тем

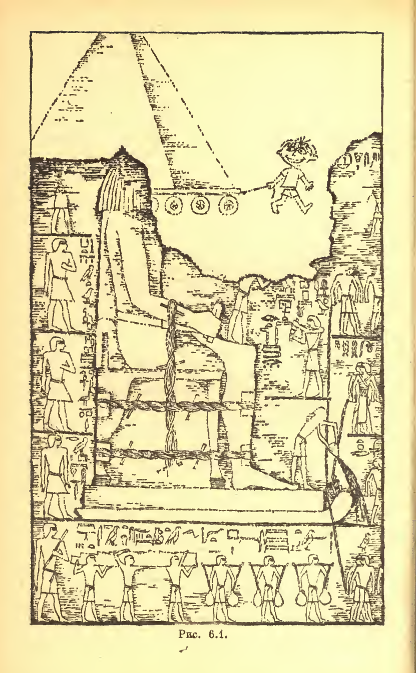


Рис. 6.1.

больше, чем больше сила, прижимающая колесо к поверхности. Кроме того, сила трения качения обратно пропорциональна радиусу колеса. Это и понятно: чем больше колесо, тем меньшее значение имеют для него неровности поверхности, по которой оно катится.



Рис. 6.2.

Если сравнивать силы, которые приходится преодолевать, заставляя тело скользить и катиться, то разница получается очень внушительная. Например, чтобы тянуть по асфальту стальную болванку массой в 1 т, нужно приложить силу в 200 кгс — на это способны лишь атлеты. А катить на тележке эту же болванку сможет и ребенок, для этого нужна сила не более 10 кгс.

Немудрено, что трение качения «победило» трение скольжения. Недаром человечество уже очень давно перешло на колесный транспорт.

Замена полозьев колесами еще не есть полная победа над трением скольжения. Ведь колесо надо насадить на ось. На первый взгляд невозможно избежать трения осей о подшипники. Так думали на протяжении веков и старались уменьшить трение скольжения в подшипниках лишь различными смазками. Услуги, оказываемые смазкой, немалые — трение скольжения уменьшается в 8—10 раз. Но даже и при смазке трение скольжения в очень многих случаях столь значительно, что обходится чрезмерно дорого. В конце прошлого века это обстоятельство сильно тормозило техническое развитие. Тогда и возникла замечательная идея заменить в подшипниках трение скольжения трением качения. Эту замену осуществляет шариковый подшипник. Между осью и втулкой поместили шарики. При вращении колеса шарики покатились по втулке, а ось — по шарикам. На рис. 6.2 показано устройство этого механизма. Таким способом трение скольжения было заменено трением качения. Силы трения уменьшились при этом в десятки раз.

Роль подшипников качения в современной технике трудно переоценить. Их делают с шариками, с цилиндрическими роликами, с коническими роликами. Такими подшипниками снабжены все машины, большие и малые. Существуют шариковые подшипники размером в миллиметр; некоторые подшипники для больших машин весят более тонны. Шарики для подшипников (вы их видели, конечно, в витринах специальных магазинов) производят самых различных диаметров — от долей миллиметра до нескольких сантиметров.

ВЯЗКОЕ ТРЕНИЕ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

До сих пор мы говорили о «сухом» трении, т. е. о трении, возникающем при соприкосновении твердых предметов. Но и плавающие, и летающие тела также подвержены действию сил трения. Меняется источник трения — сухое трение заменяется «мокрым».

Сопротивление, которое испытывает движущееся в воде или воздухе тело, подчиняется иным закономерностям, существенно отличным от законов сухого трения, о которых мы говорили выше.

Правила поведения жидкости и газа в отношении трения не различаются. Поэтому все сказанное ниже относится в равной степени и к жидкостям, и к газам. Если мы для краткости будем говорить ниже о «жидкости», сказанное будет относиться в равной степени и к газам.

Одно из отличий «мокрого» трения от сухого заключается в отсутствие трения покоя — сдвинуть с места висящий в воде или воздухе предмет можно, вообще говоря, сколь угодно малой силой. Что же касается силы трения, испытываемой движущимся телом, то она зависит от скорости движения, от формы и размеров тела и от свойств жидкости (газа). Изучение движения тел в жидкостях и газах показало, что нет единого закона для «мокрого» трения, а имеются два разных закона: один — верный при малых, а другой — при больших скоростях движения. Наличие двух законов означает, что при больших и малых скоростях движения твердых тел в жидкостях и газах обтекание средой движущегося в ней тела происходит по-разному.

При малых скоростях движения сила сопротивления прямо пропорциональна скорости движения и размеру тела:

$$F \sim vL.$$

Как надо понимать пропорциональность размеру, если не сказано, о какой форме тела идет речь? Это значит, что для двух тел, вполне подобных по форме (т. е. таких, все размеры которых находятся в одинаковом отношении), силы сопротивления относятся так же, как линейные размеры тел.

Величина сопротивления в огромной степени зависит от свойств жидкости. Сравнивая силы трения, которые испытывают одинаковые предметы, движущиеся с одинаковыми скоростями в разных средах, увидим, что тела испытывают тем бо́льшую силу сопротивления, чем более густой, или, как говорят, чем более вязкой будет среда. Поэтому трение, о котором идет речь, уместно назвать вязким трением. Вполне понятно, что воздух создает незначительное вязкое трение, примерно раз в 60 меньше, чем вода. Жидкости могут быть «негустые», как вода, и очень вязкие, как сметана или мед.

О степени вязкости жидкости можно судить либо по быстроте падения в ней твердых тел, либо по быстроте выливания жидкости из отверстий.

Вода выльется из поллитровой воронки за несколько секунд. Очень вязкая жидкость будет вытекать из нее часами, а то и днями. Можно привести пример и еще более вязких жидкостей. Геологи обратили внимание, что в кратере некоторых вулканов на внутренних склонах в скоплениях лавы встречаются шаровидные куски. На первый взгляд совершенно непонятно, как внутри кратера мог образоваться такой шар из лавы. Это непонятно, если говорить о лаве как о твердом теле. Если же лава ведет себя как жидкость, то она будет вытекать из воронки кратера каплями, как и любая другая жидкость. Но только одна капля образуется не за долю секунды, а за десятилетия. Когда капля станет очень тяжелой, она оторвется и «капнет» на дно кратера вулкана.

Из этого примера ясно, что не следует ставить на одну доску настоящие твердые тела и аморфные тела, которые, как мы знаем, много более похожи на жид-

кость, чем на кристаллы. Лава как раз такое аморфное тело. Оно кажется твердым, но на самом деле это очень вязкая жидкость.

Как вы думаете, сургуч — твердое тело? Возьмите две пробки, положите их на дно двух чашек. В одну налейте какую-нибудь расплавленную соль (например, селитру — ее легко достать), а в другую чашку с пробкой налейте сургуч. Обе жидкости застынут и погребут пробки. Поставьте эти чашки в шкаф и надолго забудьте о них. Через несколько месяцев вы увидите разницу между сургучом и солью. Пробка, залитая солью, попрежнему будет покоиться на дне сосуда. А пробка, залитая сургучом, окажется наверху. Как же это произошло? Очень просто: пробка всплыла совсем так, как она всплывает в воде. Разница лишь во времени: когда силы вязкого трения малы, пробка всплывает вверх мгновенно, а в очень вязких жидкостях всплывание продолжается месяцами.

СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ

Но вернемся к законам «мокрого» трения. Как мы выяснили, при малых скоростях сопротивление зависит от вязкости жидкости, скорости движения и линейных размеров тела. Рассмотрим теперь законы трения при больших скоростях. Но прежде надо сказать, какие скорости считать малыми, а какие большими. Нас интересует не абсолютная величина скорости, а то, является ли скорость достаточно малой, чтобы выполнялся рассмотренный выше закон вязкого трения.

Оказывается, нельзя назвать такое число метров в секунду, чтобы во всех случаях при меньших скоростях были применимы законы вязкого трения. Граница применения изученного нами закона зависит от размеров тела и от степени вязкости и плотности жидкости.

Для воздуха «малыми» являются скорости меньше

$$\frac{0,75}{L}\ \text{см/с},$$

для воды — меньше

$$\frac{0,05}{L}\ \text{см/с},$$

а для вязких жидкостей, вроде густого меда,— меньше

$$\frac{100}{L}\ \text{см/с}.$$

Таким образом, к воздуху и особенно к воде законы вязкого трения мало применимы: даже при малых скоростях, порядка 1 см/с, они будут годиться лишь для крошечных тел миллиметрового размера. Сопротивление, испытываемое ныряющим в воду человеком, ни в какой степени не подчиняется закону вязкого трения.



Рис. 6.3.

Чем же объяснить, что при изменении скорости меняется закон сопротивления среды? Причины надо искать в изменении характера обтекания жидкостью движущегося в нем тела. На рис. 6.3 изображены два круговых цилиндра, движущихся в жидкости (ось цилиндра перпендикулярна к чертежу). При медленном движении жидкость плавно обтекает движущийся предмет — сила сопротивления, которую ему приходится преодолевать, есть сила вязкого трения (рис. 6.3,*а*). При большой скорости позади движущегося тела возникает сложное запутанное движение жидкости (рис. 6.3,*б*). В жидкости то появляются, то пропадают различные струйки, они образуют причудливые фигуры, кольца, вихри. Картина струек все время меняется. Появление этого движения, называемого турбулентным, в корне меняет закон сопротивления.

Турбулентное сопротивление зависит от скорости и размеров предмета совсем иначе, чем вязкое: оно пропорционально квадрату скорости и квадрату линейных

размеров. Вязкость жидкости при этом движении перестает играть существенную роль; определяющим свойством становится ее плотность, причем сила сопротивления пропорциональна первой степени плотности жидкости (газа). Таким образом, для силы F турбулентного сопротивления справедлива формула

$$F \sim \rho v^2 L^2,$$

где v — скорость движения, L — линейные размеры предмета и ρ — плотность среды. Числовой коэффициент пропорциональности, который мы не написали, имеет различные значения в зависимости от формы тела.

ОБТЕКАЕМАЯ ФОРМА

Движение в воздухе, как мы говорили выше, почти всегда «быстрое», т. е. основную роль играет турбулентное, а не вязкое сопротивление. Турбулентное сопротивление испытывают самолеты, птицы, парашютисты. Если человек падает в воздухе без парашюта, то через некоторое время он начинает падать равномерно (сила сопротивления уравновешивает вес), но с весьма значительной скоростью, порядка 50 м/с. Раскрывание парашюта приводит к резкому замедлению падения — тот же вес уравновешивается теперь сопротивлением купола парашюта. Так как сила сопротивления пропорциональна скорости движения и размеру падающего предмета в одинаковой степени, то скорость упадет во столько раз, во сколько изменятся линейные размеры падающего тела. Диаметр парашюта около 7 м, «диаметр» человека около одного метра. Скорость падения уменьшается до 7 м/с. С такой скоростью можно безопасно приземлиться.

Надо сказать, что задача увеличения сопротивления решается значительно легче, чем обратная задача. Уменьшить сопротивление автомобилю и самолету со стороны воздуха или подводной лодке со стороны воды — важнейшие и нелегкие технические задачи.

Оказывается, что, изменяя форму тела, можно уменьшить турбулентное сопротивление во много раз. Для этого надо свести к минимуму турбулентное движение, являющееся источником сопротивления. Это дости-

гается приданием предмету специальной, как говорят, обтекаемой формы.

Какая же форма является в этом смысле наилучшей? На первый взгляд кажется, что телу надо придать такую форму, чтобы вперед двигалось острие. Такое острие, как кажется, должно с наибольшим успехом «рассекать» воздух. Но, оказывается, важно не рассекать воздух, а как можно меньше потревожить его, чтобы он очень плавно обтекал предмет. Наилучшим профилем движущегося в жидкости или газе тела является форма, тупая спереди и острая сзади *). При этом жидкость плавно стекает с острия, и турбулентное движение сводится к минимуму. Ни в коем случае нельзя направлять острые углы вперед, так как острия вызывают образование турбулентного движения.

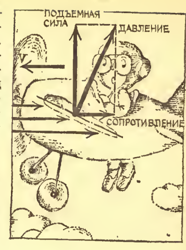


Рис. 6.4.

Обтекаемая форма крыла самолета создает не только наименьшее сопротивление движению, но и наибольшую подъемную силу, когда обтекаемая поверхность стоит наклонно вверх к направлению движения. Обтекая крыло, воздух давит на него в основном в направлении, перпендикулярном к его плоскости (рис. 6.4). Понятно, что для наклонного крыла эта сила направлена вверх.

С возрастанием угла подъемная сила растет. Но рассуждение, основанное на одних лишь геометрических соображениях, привело бы нас к неверному выводу, что чем больше угол к направлению движения, тем лучше. На самом же деле по мере увеличения угла плавное обтекание плоскости все затрудняется, а при

*) Острые носы у лодок и морских судов нужны для «разрезания» волн, т. е. лишь тогда, когда движение происходит по поверхности.

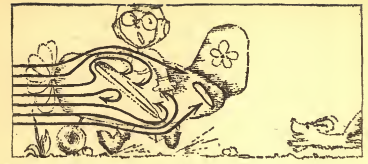


Рис. 6.5.

некотором значении угла, как это иллюстрирует рис. 6.5, возникает сильная турбулентность; сопротивление резко возрастает, и подъемная сила падает.

ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ВЯЗКОСТИ

Очень часто, объясняя какое-нибудь явление или описывая поведение тех или иных тел, мы ссылаемся на знакомые примеры. Вполне понятно, говорим мы, что этот предмет движется таким-то образом, ведь и другие тела движутся по тем же правилам. Большей частью всегда удовлетворяет объяснение, которое сводит новое к тому, что нам уже встречалось в жизни. Поэтому мы не испытывали особых трудностей, объясняя читателю законы, по которым движутся жидкости,— ведь каждый видел, как течет вода, и законы этого движения кажутся вполне естественными.

Однако есть одна совершенно удивительная жидкость, которая не похожа ни на какие другие жидкости и движется она по особым, только ей свойственным законам. Это жидкий гелий.

Мы уже говорили, что жидкий гелий сохраняется как жидкость при температуре вплоть до абсолютного нуля. Однако гелий выше 2 К (точнее, 2,19 К) и гелий ниже этой температуры — это совсем разные жидкости. Выше двух градусов свойства гелия ничем не выделяют его среди других жидкостей. Ниже этой температуры гелий становится чудесной жидкостью. Чудесный гелий называют гелием II.

Самое поразительное свойство гелия II — это открытая П. Л. Капицей в 1938 г. сверхтекучесть, т. е. полное отсутствие вязкости.

Для наблюдения сверхтекучести изготовляется сосуд, в дне которого имеется очень узкая щель — шириной всего лишь в полмикрона. Обычная жидкость почти не просачивается сквозь такую щель; так ведет себя и гелий при температуре выше 2,19 К. Но едва только температура становится ниже 2,19 К, скорость вытекания гелия скачком возрастает по крайней мере в тысячи раз. Через тончайший зазор гелий II вытекает почти мгновенно, т. е. полностью теряет вязкость. Сверхтекучесть гелия приводит к еще более странному явлению. Гелий II способен сам «вылезать» из стакана или пробирки, куда он налит. Пробирку с гелием II помещают в дьюаре над гелиевой ванной. «Ни с того ни с сего» гелий поднимается по стенке пробирки в виде тончайшей совершенно незаметной пленки и перетекает через край; с донышка пробирки капают капли.

Надо вспомнить, что благодаря капиллярным силам, о которых говорилось на стр. 37, молекулы всякой жидкости, смачивающей стенку сосуда, взбираются вверх по этой стенке и образуют на ней тончайшую пленку, ширина которой имеет порядок 10^{-6} см. Эта пленочка незаметна для глаза, да и вообще ничем себя не проявляет для обычной вязкой жидкости.

Картина совершенно меняется, если мы имеем дело с лишенным вязкости гелием. Ведь узкая щель не мешает движению сверхтекучего гелия, а тонкая поверхностная пленка — все равно что узкая щель. Лишенная вязкости жидкость течет тончайшим слоем. Через борт стакана или пробирки поверхностная пленка образует сифон, по которому гелий переливается через край сосуда.

Понятно, что у обычной жидкости мы не наблюдаем ничего похожего. При нормальной вязкости «пробраться» через сифон ничтожной толщины жидкость практически не может. Такое движение настолько медленно, что перетекание длилось бы миллионы лет.

Итак, гелий II лишен всякой вязкости. Казалось бы, отсюда с железной логикой следует вывод, что твердое тело должно в такой жидкости двигаться без трения.

Поместим в жидкий гелий диск на нити и закрутим нить. Предоставив свободу этому несложному приспособлению, мы создадим нечто вроде маятника — нить с диском будет колебаться и периодически закручиваться то в одну, то в другую сторону. Если трения нет, то мы должны ожидать, что диск будет колебаться вечно. Однако ничего подобного. Через сравнительно короткое время, примерно такое же, как и для обычного нормального гелия I (т. е. гелия при температуре выше 2,19 K), диск останавливается. Что за странность? Вытекая через щель, гелий ведет себя как жидкость без вязкости, а по отношению к движущимся в нем телам ведет себя как обычная вязкая жидкость. Вот это уж действительно совершенно необычно и непонятно.

Нам остается теперь вспомнить сказанное по поводу самого факта, что гелий не затвердевает вплоть до абсолютного нуля. Ведь дело идет о непригодности привычных нам представлений о движении. Если гелий «незаконно» остался жидким, то надо ли удивляться беззаконному поведению этой жидкости.

Понять поведение жидкого гелия можно только с точки зрения новых представлений о движении, которые получили название квантовой механики. Попытаемся дать самое общее представление о том, как квантовая механика объясняет поведение жидкого гелия.

Квантовая механика — очень хитрая и трудная для понимания теория, и пусть читатель не удивляется, что объяснение выглядит еще более странным, чем сами явления. Оказывается, каждая частица жидкого гелия участвует одновременно в двух движениях: одно движение сверхтекучее, не связанное с вязкостью, а другое — обычное.

Гелий II ведет себя таким образом, как будто бы он состоит из смеси двух жидкостей, движущихся совершенно независимо «одна через другую». Одна жидкость нормальна по поведению, т. е. обладает обычной вязкостью, другая составная часть является сверхтекучей.

Когда гелий течет через щель или перетекает через край стакана, мы наблюдаем эффект сверхтекучести. А при колебании диска, погруженного в гелий, останавливающее диск трение создается благодаря тому,

что в нормальной части гелия трение диска неизбежно.

Способность участвовать в двух разных движениях порождает и совершенно необычные теплопроводящие свойства гелия. Как уже говорилось, жидкости вообще довольно плохо проводят тепло. Подобно обычным жидкостям ведет себя и гелий I. Когда же происходит превращение в гелий II, теплопроводность его возрастает примерно в миллиард раз. Таким образом, гелий II проводит тепло лучше, чем самые лучшие обычные проводники тепла — такие, как медь и серебро.

Дело в том, что сверхтекучее движение гелия в передаче тепла не участвует. Поэтому, когда в гелии II есть перепад температур, то возникают два течения, идущие в противоположных направлениях, и одно из них — нормальное — несет с собой тепло. Это совершенно не похоже на обычную теплопроводность. В обычной жидкости тепло передается ударами молекул. В гелии II тепло течет вместе с обычной частью гелия, течет, как жидкость. Вот уж здесь термин «поток тепла» оправдан полностью. Такой способ передачи тепла и приводит к огромной теплопроводности.

Это объяснение теплопроводности гелия может показаться настолько странным, что вы откажетесь в него поверить. Но в справедливости сказанного можно убедиться непосредственно на следующем простом по своей идее опыте.

В ванне с жидким гелием находится дьюар, также полностью заполненный гелием. Сосуд сообщается с ванной капиллярным отростком. Гелий внутри сосуда нагревается электрической спиралью, тепло не переходит к окружающему гелию, так как стенки сосуда не передают тепло.

Напротив капиллярной трубки находится крылышко, подвешенное на тонкой нити. Если тепло течет как жидкость, то оно должно повернуть крылышко. Именно это и происходит. При этом количество гелия в сосуде не изменяется. Как же объяснить это чудесное явление? Лишь единственным способом: при нагревании возникает поток нормальной части жидкости от нагретого места к холодному и поток сверхтекучей части в обратную сторону. Количество гелия в каждой точке не меняется, но так как вместе с переносом тепла

движется нормальная часть жидкости, то крылышко поворачивается благодаря вязкому трению этой части и остается отклоненным столько времени, сколько продолжается нагрев.

Из того, что сверхтекучее движение не переносит тепла, следует и другой вывод. Выше говорилось о «переползании» гелия через край стакана. Но «вылезает» из стакана сверхтекучая часть, а остается нормальная. Тепло связано только с нормальной частью гелия, оно не сопровождает «вылезающую» сверхтекучую часть. Значит, по мере «вылезания» гелия из сосуда одно и то же тепло будет приходиться на все меньшее количество гелия — остающийся в сосуде гелий должен нагреваться. Это действительно наблюдается при опыте.

Массы гелия, связанные с сверхтекучим и нормальным движением, не одинаковы. Отношение их зависит от температуры. Чем ниже температура, тем больше сверхтекучая часть массы гелия. При абсолютном нуле весь гелий становится сверхтекучим. По мере повышения температуры все бо́льшая часть гелия начинает вести себя нормально и при температуре 2,19 K весь гелий становится нормальным, приобретает свойства обычной жидкости.

Но у читателя уже вертятся на языке вопросы: что же это за сверхтекучий гелий, как может частица жидкости участвовать одновременно в двух движениях, как объяснить сам факт двух движений одной частицы?.. К сожалению, мы вынуждены оставить здесь все эти вопросы без ответа. Теория гелия II слишком сложна, и чтобы ее понять, надо знать очень много.

ПЛАСТИЧНОСТЬ

Упругость — это способность тела восстанавливать свою форму после того, как сила перестала действовать. Если к метровой стальной проволоке с поперечным сечением в 1 мм² подвесить килограммовую гирю, то проволока растянется. Растяжение незначительно, всего лишь 0,5 мм, но его нетрудно заметить. Если гирю снять, то проволока сократится на те же 0,5 мм, и метка вернется в прежнее положение. Такая деформация и называется упругой.

Заметим, что проволока сечением в 1 мм^2 под действием силы в 1 кгс и проволока сечением в 1 см^2 под действием силы в 100 кгс находятся, как говорят, в одинаковых условиях механического напряжения. Поэтому поведение материала всегда надо описывать, указывая не силу (что беспредметно, если сечение тела неизвестно), а напряжение, т. е. силу, приходящуюся на единицу площади. Обычные тела — металлы, стекло, камни — можно упруго растянуть в лучшем случае всего лишь на несколько процентов. Выдающимися упругими свойствами обладает резина. Резину можно упруго растянуть на несколько сот процентов (т. е. сделать ее вдвое и втрое больше первоначальной длины), а отпустив такой резиновый шнур, мы увидим, что он вернется в исходное состояние.

Все без исключения тела под действием небольших сил ведут себя упруго. Однако предел упругому поведению наступает у одних тел раньше, у других значительно позже. Например, у таких мягких металлов, как свинец, предел упругости наступает уже, если подвесить к концу проволоки миллиметрового сечения груз 0,2—0,3 кгс. У таких твердых материалов, как сталь, этот предел примерно в 100 раз выше, т. е. лежит около 25 кгс.

По отношению к большим силам, превосходящим предел упругости, разные тела можно грубо разделить на два класса — такие, как стекло, т. е. хрупкие, и такие, как глина, т. е. пластичные.

Если прижать палец к куску глины, он оставит отпечаток, в точности передающий даже сложные завитушки рисунка кожи. Молоток, если им ударить по куску мягкого железа или свинца, оставит четкий след. Воздействия нет, а деформация осталась — ее называют пластической или остаточной. Таких остаточных следов не удастся получить на стекле: если упорствовать в этом намерении, то стекло разрушится. Столь же хрупки некоторые металлы и сплавы, например чугун. Железное ведро под ударом молота сплющится, а чугунный котелок расколется. О прочности хрупких тел можно судить по следующим цифрам. Чтобы превратить в порошок кусок чугуна, надо действовать с силой около 50—80 кгс на квадратный миллиметр поверхности. Для кирпича эта цифра падает до 1,5—3 кгс.

Как и всякая классификация, деление тел на хрупкие и пластичные в достаточной степени условно. Прежде всего хрупкое при малой температуре тело может стать пластичным при более высоких температурах. Стекло можно превосходно обрабатывать, как пластический материал, если нагреть его до температуры в несколько сот градусов.

Мягкие металлы, как свинец, можно ковать холодными, но твердые металлы поддаются ковке лишь в сильно нагретом, раскаленном виде. Повышение температуры резко увеличивает пластические свойства материалов.

Одной из существенных особенностей металлов, которые сделали их незаменимыми конструкционными материалами, является их твердость при комнатных температурах и пластичность при высоких: раскаленным металлам легко можно придать требуемую форму, а при комнатной температуре изменить эту форму можно лишь очень значительными силами.

Существенное влияние на механические свойства оказывает внутреннее строение материала. Понятно, что трещины и пустоты ослабляют видимую прочность тела и делают его более хрупким.

Замечательна способность пластически деформируемых тел упрочняться. Одиночный кристалл металла, только что выросший из расплава, очень мягок. Кристаллы многих металлов настолько мягки, что их легко согнуть пальцами, но ... разогнуть такой кристалл не удастся. Произошло упрочнение. Теперь этот образец удастся пластически деформировать лишь существенно большей силой. Оказывается, пластичность есть не только свойство материала, но и свойство обработки.

Почему инструмент готовят не литьем металла, а ковкой? Причина понятна — металл, подвергшийся ковке (или прокату, или протяжке), много прочнее литого. Сколько бы ни ковать металл, мы не сумеем поднять его прочность выше некоторого предела, который называют пределом текучести. Для стали этот предел лежит в интервале 30—50 кгс/мм².

Эта цифра означает следующее. Если на проволоку миллиметрового сечения подвесить пудовую гирю (ниже предела), то проволока начнет растягиваться и одно-

временно упрочняться. Поэтому растяжение быстро прекратится — гиря будет спокойно висеть на проволоке. Если же на такой проволоке подвесить двух-трехпудовую гирю (выше предела текучести), то картина будет иной. Проволока будет непрерывно тянуться (течь), пока не разорвется. Еще раз подчеркнем, что механическое поведение тела определяется не силой, а напряжением. Проволока сечением в 100 мкм² будет течь под действием груза $30-50 \cdot 10^{-4}$ кгс, т. е. 3—5 гс.

ДИСЛОКАЦИИ

Доказывать, что пластическая деформация — явление, имеющее огромное значение для практики — значит, ломиться в открытую дверь. Ковка, штамповка, получение металлических листов, вытягивание проволок — все это явления, имеющие одну природу.

Мы ничего не могли бы понять в пластической деформации, если бы считали, что кристаллиты, из которых построен металл, являются идеальными осколками пространственных решеток.

Теория механических свойств идеального кристалла была создана еще в начале нашего века. Она расходилась с опытом примерно в тысячу раз. Если бы кристалл был идеальным, то его прочность на разрыв должна была бы быть на много порядков выше наблюдаемой и пластическая деформация требовала бы огромных усилий.

Гипотезы зародились ранее, чем накопились факты. Исследователям было очевидно, что единственным выходом, позволяющим примирить теорию и практику, является допущение о наличии у кристаллитов дефектов. Но, конечно, о характере этих дефектов можно было делать самые различные предположения. Лишь тогда, когда физики вооружились тончайшими методами исследования строения вещества, картина стала проясняться. Оказалось, что идеальный кусок решетки (блок) имеет размеры порядка нескольких миллионных долей сантиметра. Блоки дезориентированы в пределах секунд или минут дуги.

К концу двадцатых годов скопилось много фактов, которые привели к важному утверждению, что главным

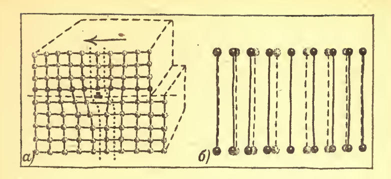


Рис. 6.6.

(хотя и не единственным) дефектом реального кристалла является закономерное смещение, получившее название дислокации. Простая дислокация иллюстрируется модельным рис. 6.6. Как видите, сущность дефекта заключается в том, что в кристалле существуют места, содержащие как бы одну «лишнюю» атомную плоскость. Пунктирная линия на рис. 6.6, *а* разделяет два блока. Верхняя часть кристалла сжата, а нижняя — растянута. Дислокация быстро рассасывается, как это показано на рис. 6.6, *б*, изображающем вид на левый рисунок «сверху».

Другие дислокации, которые часто встречаются в кристаллах, называются спиральными. Их схемы показаны на рис. 6.7. Здесь решетка разбита на два блока, один из которых своей частью как бы соскользнул на один период по отношению к соседнему. Наибольшие искажения сосредоточены около оси. Область, примыкающая к этой оси, и называется спиральной дислокацией.

Мы лучше поймем, в чем сущность искажения, если рассмотрим схему на том же рисунке, изображающую две соседние атомные плоскости по одну и другую сторону плоскости разреза (рис. 6.7, *б*). По отношению к трехмерному рисунку это вид на плоскости справа. Ось спиральной дислокации та же, что и на трехмерном рисунке. Сплошными линиями показана плоскость правого, пунктирными — левого блока. Черные точки расположены к читателю ближе, чем белые. Как видно из схемы, спиральная дислокация представляет собой

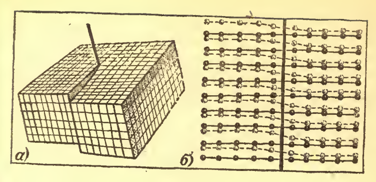


Рис. 6.7.

иной тип искажения, отличный от простого. Лишнего ряда атомов здесь нет. Искажение состоит в том, что вблизи оси зацепления атомные ряды меняют своих ближайщих соседей, а именно изгибаются и подравниваются к соседям, находящимся этажом ниже.

Почему эта дислокация называется спиральной? Представьте себе, что вы шагаете по атомам (предварительно уменьшившись до субатомного размера) и поставили перед собой цель обойти кругом ось дислокации. Нетрудно видеть, что, начав свое путешествие с самой нижней плоскости, вы после каждого оборота будете попадать этажом выше и в конце концов выйдете на верхнюю поверхность кристалла так, как если бы вы шли по спиральной лестнице. На нашем рисунке подъем снизу происходил против часовой стрелки. Если бы сдвиг блоков был обратным, то путешествие происходило бы по часовой стрелке.

Теперь мы подошли к ответу на вопрос о том, как происходит пластическая деформация.

Предположим, что мы хотим сдвинуть верхнюю половинку кристалла по отношению к нижней на одно межатомное расстояние. Вы видите, что для этого придется перекатить друг через друга все ряды атомов, расположенные в плоскости сдвига. Совершенно иначе обстоит дело при действии силы сдвига на кристалл с зацеплением.

На рис. 6.8 показана плотная упаковка шаров (показаны только крайние шары атомных рядов), содержащая простую дислокацию. Начнем сдвигать вправо

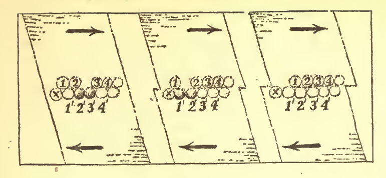


Рис. 6.8.

верхний блок по отношению к нижнему. Чтобы легче было разобраться в происходящем, мы пометили шары цифрами; шары сжатого слоя помечены цифрами со штрихами. В какой-то исходный момент «трещина» была между рядами *2* и *3*; сжатыми были ряды *2'* и *3'*. Как только подействует сила, ряд *2* сдвинется в трещину; теперь шар *3'* может «вздохнуть свободно», зато придется сжаться шару *1'*. Что же произошло? Вся дислокация передвинулась влево, и ее движение будет таким же образом продолжаться до тех пор, пока дислокация не «выйдет» из кристалла. Результатом будет сдвиг на один ряд атомов, т. е. такой же результат, как при сдвиге идеального кристалла.

Не приходится доказывать, что дислокационный сдвиг требует намного меньше силы. В первом случае надо преодолеть взаимодействие между атомами — перекатить все атомные ряды; во втором случае в каждый момент перекатывается лишь один-единственный ряд атомов.

Произведенные расчеты показали, что прочность кристалла в предположении сдвига без наличия дислокаций в сто раз больше значения прочности, наблюдаемой на опыте. Наличие незначительного числа дислокаций способно уменьшить прочность в значительное число раз.

Однако возникает следующая трудность. Как это ясно из рисунка, приложенная сила «выгоняет» дислокацию из кристалла. Значит, по мере увеличения степени деформации кристалл должен становиться все проч-

нее и, наконец, когда последняя из дислокаций будет удалена, кристалл должен достичь согласно теории прочности примерно в сто раз большей прочности идеального правильного кристалла. Кристалл действительно упрочняется по мере увеличения степени деформации, но далеко не в сто раз. Спасают положение спиральные дислокации. Оказывается (но здесь читатель должен поверить нам на слово, так как очень трудно иллюстрировать это чертежом), спиральные дислокации не так-то просто «выгнать» из кристалла. Кроме того, сдвиг кристалла может происходить с помощью дислокаций обоих типов. Теория дислокаций удовлетворительно объясняет особенности явлений сдвига кристаллических плоскостей. Движение беспорядка вдоль кристалла — вот что такое с современной точки зрения представляет собой пластическая деформация кристаллов.

ТВЕРДОСТЬ

Прочность и твердость не идут друг с другом об руку. Веревочный канат, лоскут сукна, шелковая нить могут обладать весьма большой прочностью — нужно значительное напряжение, чтобы разорвать их. Разумеется, никто не скажет, что веревка и сукно — твердые материалы. И наоборот, прочность стекла невелика, а стекло — твердый материал.

Понятие твердости, которым пользуются в технике, заимствовано из житейской практики. Твердость — это противодействие внедрению. Тело твердое, если его трудно процарапать, трудно оставить на нем отпечаток. Определения эти могут показаться читателю несколько туманными. Мы привыкли к тому, что физическое понятие выражают числом. Как же это сделать в отношении твердости?

Один весьма кустарный, но в то же время практически полезный способ уже давно используется минерологами. Десять определенных минералов располагают в ряд. Первым стоит алмаз, за ним следует корунд, далее — топаз, кварц, полевой шпат, апатит, плавиковый шпат, известковый шпат, гипс и тальк. Ряд подобран следующим образом: алмаз оставляет царапину

на всех минералах, но ни один из этих минералов не может процарапать алмаз. Это и значит, что алмаз самый твердый минерал. Твердость алмаза оценивается числом 10. Следующий в ряду за алмазом корунд тверже всех других нижестоящих минералов — корунд может их процарапать. Корунду присваивают число твердости 9. Числа 8, 7 и 6 присвоены соответственно топазу, кварцу и полевому шпату на тех же основаниях. Каждый из них тверже (т. е. может нанести царапину), чем все нижестоящие минералы, и мягче (сам может быть процарапан) минералов, имеющих бо́льшие числа твердости. Самый мягкий минерал — тальк — имеет одну единицу твердости.

«Измерение» (приходится это слово брать в кавычки) твердости при помощи этой шкалы заключается в нахождении места интересующего нас минерала в ряду десяти выбранных стандартов.

Если неизвестный минерал можно процарапать кварцем, но сам он оставляет царапину на полевом шпате, то его твердость равна 6,5.

Металловеды пользуются другим способом определения твердости. Стандартной силой (обычно 3000 кгс), при помощи стального шарика диаметром в 1 см на испытуемом материале делается вмятина. Радиус образовавшейся ямки принимается за число твердости.

Твердость по отношению к царапанию и твердость по отношению к вдавливанию не обязательно сочетаются, и один материал может оказаться тверже другого при испытании на царапание, но мягче при испытании на вдавливание.

Таким образом, нет универсального понятия твердости, не зависящего от способа измерения. Понятие твердости относится поэтому к техническим, но не к физическим понятиям.

ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Мы уже сообщили читателю много сведений о колебаниях. Как колеблется маятник, шарик на пружинке, каковы закономерности колебания струны — этим вопросам была посвящена одна из глав книги 1. Мы не говорили о том, что происходит в воздухе или другой среде,

когда находящееся в ней тело совершает колебания. Не вызывает сомнения, что среда не может остаться равнодушной к колебаниям. Колеблющийся предмет толкает воздух, смещает частицы воздуха из тех положений, в которых они находились ранее. Понятно также, что дело не может ограничиться влиянием лишь на близлежащий слой воздуха. Тело сожмет ближайший слой, этот слой давит на следующий — и так слой за слоем, частица за частицей приводится в движение весь окружающий воздух. Мы говорим, что воздух пришел в колебательное состояние или что в воздухе происходят звуковые колебания.

Мы называем колебания среды звуковыми, но это не значит, что все звуковые колебания мы слышим. Физика пользуется понятием звуковых колебаний в более широком смысле. Какие звуковые колебания мы слышим — об этом будет рассказано ниже.

Речь идет о воздухе лишь потому, что звук чаще всего передается через воздух. Но, разумеется, нет никаких особых свойств у воздуха, чтобы за ним оказалось монопольное право совершать звуковые колебания. Звуковые колебания возникают в любой среде, способной сжиматься, а так как несжимающихся тел в природе нет, то, значит, частицы любого материала могут оказаться в этих условиях. Учение о таких колебаниях обычно называют акустикой.

При звуковых колебаниях каждая частица воздуха в среднем остается на месте — она совершает лишь колебания около положения равновесия. В самом простейшем случае частица воздуха может совершать гармоническое колебание, которое, как мы помним, происходит по закону синуса. Такое колебание характеризуется максимальным смещением от положения равновесия — амплитудой и периодом колебания, т. е. временем, затрачиваемым на совершение полного колебания.

Для описания свойств звуковых колебаний чаще пользуются понятием частоты колебания, нежели периодом. Частота $\nu = 1/T$ есть величина, обратная периоду. Единица частоты — обратная секунда ($с^{-1}$), однако, такое слово не распространено. Говорят — секунда в минус первой степени или герц (Гц). Если частота колебания равна 100 $с^{-1}$, то это значит, что за одну секунду частица воздуха совершит 100 полных колеба-

ний. Так как в физике весьма часто приходится иметь дело с частотами, которые во много раз больше герца, то имеют широкое применение единицы килогерц (1 кГц$=10^3$ Гц) и мегагерц (1 МГц$=10^6$ Гц).

При прохождении равновесного положения скорость колеблющейся частицы максимальна. Напротив, в положениях крайних смещений скорость частицы, естественно, равняется нулю. Мы уже говорили, что если смещение частицы подчиняется закону гармонического колебания, то и изменение скорости колебания следует тому же закону. Если обозначить амплитуду смещения через s_0, а скорости через v_0, то $v_0=2\pi s_0/T$ или $v_0=2\pi\nu s_0$. Громкий разговор приводит частицы воздуха в колебание с амплитудой смещения всего лишь в несколько миллионных долей сантиметра. Амплитудное значение скорости будет величиной порядка 0,02 см/с.

Другая важная физическая величина, колеблющаяся вместе со смещением и скоростью частицы,— это избыточное давление, называемое также звуковым. Звуковое колебание воздуха состоит в периодическом чередовании сжатия и разрежения в каждой точке среды. Давление воздуха в любом месте то больше, то меньше давления, которое было при отсутствии звука. Этот избыток (или недостаток) давления и называется звуковым. Звуковое давление составляет совсем небольшую долю нормального давления воздуха. Для нашего примера — громкий разговор — амплитуда звукового давления будет равна примерно миллионной доле атмосферы. Звуковое давление прямо пропорционально скорости колебания частицы, причем отношение этих физических величин зависит только от свойств среды. Например, звуковому давлению в воздухе в 1 дин/см^2 соответствует скорость колебания 0,025 см/с.

Струна, колеблющаяся по закону синуса, приводит и частицы воздуха в гармоническое колебание. Шумы и музыкальные аккорды приводят к значительно более сложной картине. На рис. 6.9 показана запись звуковых колебаний, а именно звукового давления в зависимости от времени. Эта кривая мало похожа на синусоиду. Оказывается, однако, что любое сколь угодно сложное колебание может быть представлено как результат наложения одной на другую большого числа синусоид с разными амплитудами и частотами. Эти простые коле-

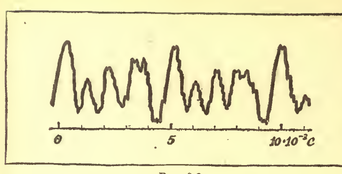


Рис. 6.9.

бания, как говорят, составляют спектр сложного колебания. Для простого примера такое сложение колебаний показано на рис. 6.10.

Если бы звук распространялся мгновенно, то все частицы воздуха колебались бы, как одна. Но звук распространяется не мгновенно, и объемы воздуха, лежащие на линии распространения, приходят в движение по очереди, как бы подхватываются волной, идущей от источника. Так же точно щепка лежит спокойно на воде до тех пор, пока круговые водяные волны от брошенного камешка не подхватят ее и не приведут в колебание.

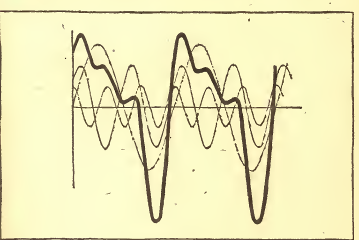


Рис. 6.10.

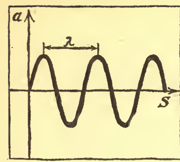


Рис. 6.11.

Остановим наше внимание на одной колеблющейся частице и сравним ее поведение с движением других частиц, лежащих на той же линии распространения звука. Соседняя частица придет в колебание немного позже, следующая — еще позже. Запаздывание будет нарастать, пока, наконец, мы не встретимся с частицей, отставшей на целый период и поэтому колеблющейся в такт с исходной. Так отставший на целый круг неудачный бегун может пройти линию финиша одновременно с лидером. На каком же расстоянии встретим мы точку, колеблющуюся в такт с исходной? Нетрудно сообразить, что это расстояние λ равно произведению скорости распространения звука *c* на период колебания *T*. Расстояние λ называется длиной волны:

$$\lambda = cT.$$

Через промежутки λ мы будем встречать колеблющиеся в такт точки. Точки, находящиеся на расстоянии λ/2, будут совершать движение одна по отношению к другой, как предмет, колеблющийся перпендикулярно к зеркалу, по отношению к своему изображению.

Если изобразить смещение (или скорость, или звуковое давление) всех точек, лежащих на линии распространения гармонического звука, то получится опять синусоида.

Не следует путать графики волнового движения и колебаний. Рис. 6.11 и 6.12 очень похожи, но на первом по горизонтальной оси отложено расстояние, а на втором — время. Один рисунок представляет собой временну́ю развертку колебания, а другой — мгновенную «фотографию» волны. Из сопоставления этих рисунков видно, что длина волны может быть названа также ее пространственным периодом: роль *T* во времени играет в пространстве величина λ.

На рисунке звуковой волны смещения частицы отложены по вертикали, а направлением распространения

волны, вдоль которого отсчитывается расстояние, является горизонталь. Это может навести на неверную мысль, что частицы смещаются перпендикулярно к направлению распространения волны. В действительности частицы воздуха всегда колеблются вдоль направления распространения звука. Такая волна называется продольной.

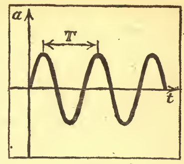


Рис. 6.12.

Свет распространяется несравненно быстрее, чем звук,— практически мгновенно. Гром и молния происходят в один и тот же момент, но молнию мы видим в момент ее возникновения, а звук грома доходит до нас со скоростью примерно один километр за три секунды (скорость звука в воздухе составляет 330 м/с). Значит, когда слышен гром, опасность удара молнии уже миновала.

Зная скорость распространения звука, обычно можно определить, как далеко проходит гроза. Если от момента выспышки молнии до раската грома прошло 12 с, значит, гроза от нас за 4 км.

Скорость звука в газах примерно равна средней скорости движения молекул газа. Она также не зависит от плотности газа и пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры. Жидкости проводят звук быстрее, чем газы. В воде звук распространяется со скоростью 1450 м/с, т. е. в 4,5 раза быстрее, чем в воздухе. Еще больше скорость звука в твердых телах, например, в железе — около 6000 м/с.

Когда звук переходит из одной среды в другую, меняется скорость его распространения. Но одновременно происходит и другое интересное явление — частичное отражение звука от границы между двумя средами. Какая доля звука отразится — это зависит главным образом от соотношения плотностей. В случае падения звука из воздуха на твердые или жидкие поверхности или, наоборот, из плотных сред в воздух звук отражается почти полностью. Когда звук попадает в воду из возду-

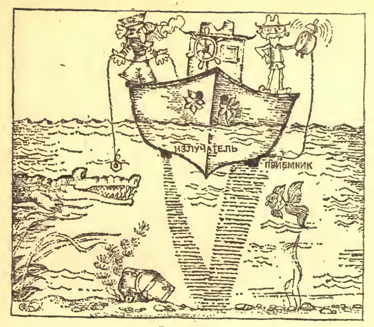


Рис. 6.13.

ха или, наоборот, из воды в воздух, то во вторую среду проходит всего лишь 1/1000 силы звука. Если обе среды плотные, то отношение между проходящим и отраженным звуком может быть и невелико. Например, из воды в сталь или из стали в воду пройдет 13%, а отразится 87% звука.

Явление отражения звука широко применяется в навигации. На нем основано устройство прибора для измерения глубины — эхолота. У одного борта корабля под водой помещают источник звука (рис. 6.13). Отрывистый звук создает звуковые лучи, которые проберутся сквозь водяную толщу ко дну моря или реки, отразятся от дна, и часть звука вернется на корабль, где ее улавливают чувствительные приборы. Точные часы укажут, сколько времени понадобилось звуку на это путешествие. Скорость звука в воде известна, и простым вычислением можно получить точные сведения о глубине.

Направляя звук не вниз, а вперед или в стороны, можно при его помощи определить, нет ли около корабля

опасных подводных скал или глубоко погруженных в воду айсбергов.

Все частицы воздуха, окружающего звучащее тело, находятся в состоянии колебания. Как мы выяснили в книге 1, колеблющаяся по закону синуса материальная точка обладает определенной и неизменной полной энергией.

Когда колеблющаяся точка проходит положение равновесия, скорость ее максимальна. Так как смещение точки в это мгновение равняется нулю, то вся энергия сводится к кинетической:

$$E = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Следовательно, полная энергия пропорциональна квадрату амплитудного значения скорости колебания.

Это верно и для частиц воздуха, колеблющихся в звуковой волне. Однако частица воздуха — это нечто неопределенное. Поэтому энергию звука относят к единице объема. Эту величину можно назвать плотностью звуковой энергии.

Так как масса единицы объема есть плотность ρ, то плотность звуковой энергии

$$w = \frac{\rho v_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Мы говорили выше еще об одной важной физической величине, совершающей колебания по закону синуса с той же частотой, что и скорость. Это — звуковое или избыточное давление. Так как эти величины пропорциональны, то можно сказать, что плотность энергии пропорциональна квадрату амплитудного значения звукового давления.

Амплитуда скорости звукового колебания при громком разговоре равняется 0,02 см/с. 1 см³ воздуха весит около 0,001 г. Таким образом, плотность энергии равняется

$$\frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0{,}02)^2 \text{ эрг/см}^3 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ эрг/см}^3.$$

Пусть колеблется источник звука. Он излучает звуковую энергию в окружающий воздух. Энергия как бы «течет» от звучащего тела. Через каждую площадку,

расположенную перпендикулярно к линии распространения звука, за секунду протекает определенное количество энергии. Эта величина называется потоком энергии, прошедшим через площадку. Если, кроме того, взята площадка в 1 см², то протекшее количество энергии называют интенсивностью звуковой волны.

Нетрудно видеть, что интенсивность звука I равна произведению плотности энергии w на скорость звука c. Представим цилиндрик высотой 1 см и площадью основания 1 см², образующие которого параллельны направлению распространению звука. Содержащаяся внутри такого цилиндра энергия w будет полностью покидать его через время $1/c$. Таким образом, через единицу площади за единицу времени пройдет энергия $\frac{w}{1/c}$, т. е. wc. Энергия как бы сама движется со скоростью звука.

При громком разговоре интенсивность звука вблизи собеседников будет примерно равна (мы воспользуемся числом, полученным выше)

$$2 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^{4} = 0{,}006 \text{ эрг/(см}^2 \cdot \text{с)}.$$

СЛЫШИМЫЙ И НЕСЛЫШИМЫЙ ЗВУКИ

Какие же звуковые колебания воспринимаются человеком на слух? Оказывается, ухо способно воспринимать лишь колебания, лежащие примерно в интервале от 20 до 20 000 Гц. Звуки с большой частотой мы называем высокими, с малой частотой — низкими.

Какие же длины волн соответствуют предельным слышимым частотам? Так как скорость звука примерно равна 300 м/с, то по формуле $\lambda = cT = c/\nu$ находим, что длины слышимых звуковых волн лежат в пределах от 15 м для самых низких тонов до 3 см для самых высоких.

Каким же образом мы «слышим» эти колебания?

Работа нашего органа слуха до сих пор не выяснена до конца. Дело в том, что во внутреннем ухе (в улитке — канале длиной несколько сантиметров, заполненном жидкостью) имеется несколько тысяч чувствительных нервов, способных воспринимать звуковые колебания, передающиеся в улитку из воздуха через барабанную перепонку. В зависимости от частоты тона сильнее

всего колеблется та или иная часть улитки. Хотя чувствительные нервы расположены вдоль улитки так часто, что возбуждается сразу большое их число, человек (и животные) способен — особенно в детстве — различать изменения частоты на ничтожные (тысячные) ее доли. Каким образом это происходит, до сих пор точно не известно. Ясно только, что важнейшую роль здесь играет анализ в мозгу раздражений, приходящих от множества отдельных нервов. Придумать механическую модель, которая — при той же конструкции — столь же хорошо различала бы частоту звука, как и ухо человека, пока еще не удалось.

Частота звука в 20 000 Гц является пределом, выше которого человеческое ухо не воспринимает механические колебания среды. Различными способами можно создать колебания более высокой частоты, человек их не услышит, но приборы смогут записать. Впрочем, не только приборы фиксируют такие колебания. Многие животные — летучие мыши, пчелы, киты и дельфины (как видно, дело не в размерах живого существа) — способны воспринимать механические колебания с частотой вплоть до 100 000 Гц.

Сейчас удается получать колебания с частотой вплоть до миллиарда герц. Такие колебания, хотя они и неслышимы, называют ультразвуковыми, чтобы подтвердить их родственность звуку. Ультразвуки наибольших частот получают при помощи кварцевых пластинок. Такие пластины вырезаются из монокристаллов кварца.

Глава 7

ПРЕВРАЩЕНИЯ МОЛЕКУЛ

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Физика является фундаментом всего естествознания. Поэтому отделить физику от химии, геологии, метеорологии, биологии... совершенно невозможно. Ведь основные законы природы относятся к предмету физики. Учение о строении вещества также неотъемлемая глава физики. Не случайно написаны книги под названием геологическая физика, биологическая физика, химическая физика, строительная физика и т. д. Так что сказать несколько слов о химических реакциях в этой книге, трактующей об основных законах природы, будет вполне уместно.

Строго говоря, химия начинается там, где молекула разламывается на части, или там, где из двух молекул образуется одна, или в случае, когда из двух столкнувшихся молекул образуются две другие. Если в начале и конце явления мы сталкиваемся с тем, что химический состав тел, участвующих в событии, изменился — значит, произошла реакция.

Химические реакции могут происходить «сами по себе», т. е. благодаря движениям молекул, свойственным данной температуре. Так, часто говорят: «вещество разлагается». Это означает, внутренние колебания атомов молекулы приводят к тому, что связи между атомами разрываются — молекула разваливается.

Чаще всего химическая реакция является результатом встречи молекул. Металл проржавел. Это химическая реакция: встретились атом металла с молекулой воды — образовалась окись. Бросили в стакан воды щепотку лимонной кислоты и ложечку соды. Начинает-

ся бурное образование пузырьков газа. В результате встречи этих двух молекул получились новые вещества и в том числе углекислый газ, пузырьки которого и выделяются из воды.

Итак, самопроизвольный развал молекулы и столкновения молекул — вот две причины химической реакции.

Но реакции могут быть вызваны и другими причинами. Вы с досадой рассматриваете костюм, который побывал с вами на юге. Материал выцвел, выгорел. Под действием солнечных лучей произошло химическое превращение краски, которой был выкрашен материал.

Реакции, происходящие под действием света, называются фотохимическими. Исследователю надо тщательно проводить соответствующие опыты, чтобы не свалить в одну кучу нагревание, происходящее под действием света (оно приводит к увеличению кинетической энергии движения молекул, и удары между ними будут более частыми и более сильными), с непосредственным действием света, которое состоит в том, что частица света — фотон — «рвет» химические связи.

Под действием света происходит цепь химических реакций, протекаемых в зеленых растениях, называемая фотосинтезом. Благодаря фотохимическому превращению, происходящему в растениях, осуществляется тот великий круговорот углерода, без которого не было бы жизни.

Разрыв химических связей, сопровождающийся различными химическими реакциями, могут производить и другие энергичные частицы — электроны, протоны и т. д.

Химическая реакция может идти как с поглощением тепла, так и с выделением тепла. Что это значит на языке молекул? Если встретились две медленные молекулы, а из них образовались две быстрые, то, значит, тепло выделилось. Ведь мы знаем, что увеличение температуры эквивалентно убыстрению молекул. К таким реакциям относятся горение и взрыв, о которых мы поговорим чуть ниже.

Теперь нам надо перевести на язык молекул скорость реакций. Превосходно известно, что есть реакции, которые происходят в мгновение ока (взрыв), а есть реакции, которые протекают годами. Положим, что опять-таки

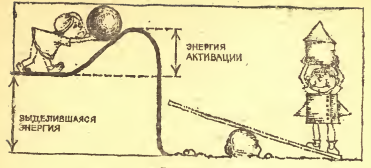


Рис. 7.1.

речь идет о таких реакциях, в которых сталкиваются две молекулы, а из них образуются две другие. Следующее предположение похоже на правду. Во-первых, существенна та энергия столкновения, которой достаточно для того, чтобы произошел разлом молекул и их перестройка, во-вторых, важно и следующее — под любым углом атаки или лишь под некоторыми должны встретиться молекулы, чтобы реакция произошла.

Минимальная энергия, необходимая для того, чтобы реакция прошла, носит название энергии активации. Она играет основную роль в ходе реакции, но все же не нужно забывать и второй фактор — долю «удачных» соударений частиц с данной энергией.

Химическую реакцию, идущую с выделением тепла, можно моделировать картинкой, приведенной на рис. 7.1. Шарик вкатывается на горку, переваливает через барьер и скатывается вниз. Поскольку начальный уровень выше конечного, то энергии потратится меньше, чем выделится.

Эта модель наглядно иллюстрирует причину резкой зависимости скорости реакции от температуры. Если температура мала, то «скорость шара» недостаточна, чтобы забраться на гору. По мере роста температуры все более и более будет расти число шариков, которые будут перемахивать через горку. Скорости химических реакций очень сильно зависят от температуры. Как правило, повышение температуры на 10 градусов увеличивает скорость реакции в 2—4 раза. Если скорость реакции увеличивается, скажем, в 3 раза при повыше-

нии температуры на 10 градусов, то повышение температуры на 100 градусов дает увеличение в $3^{10} \approx 60\,000$ раз, на 200 градусов — уже в $3^{20} \approx 4 \cdot 10^9$, а на 500 градусов — в 3^{50}, т. е. примерно в 10^{24} раз. Неудивительно, что реакция, которая идет с нормальной скоростью при температуре 500°С, при комнатной температуре не происходит вообще.

ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ

Для того чтобы началось горение, надо, как известно, поднести к горючему предмету горящую спичку. Но и спичка не зажигается сама, ею надо чиркнуть о коробку. Таким образом, для того чтобы началась такая химическая реакция, необходимо предварительное нагревание. Поджигание создает в начальный момент необходимую для реакции температуру. Дальше высокую температуру поддерживает уже тепло, которое выделяется при реакции.

Начальный местный подогрев должен быть достаточен для того, чтобы выделение тепла при реакции превышало теплоотдачу в окружающую холодную среду. Поэтому каждая реакция имеет свою, как говорят, температуру воспламенения. Горение начинается, только если начальная температура выше температуры воспламенения. Например, температура воспламенения дерева 610°С, бензина — около 200°С, белого фосфора — 50°С.

Горение дров, угля или нефти — это химическая реакция соединения этих веществ с кислородом воздуха. Поэтому такая реакция идет с поверхности: пока не выгорит внешний слой, следующий не может принять участие в горении. Этим и объясняется относительная медленность горения. В справедливости сказанного нетрудно убедиться на практике. Если размельчать горючее, то скорость горения можно значительно увеличить. Для этой цели во многих печных устройствах производится распыление угля в топках.

Так же размельчается и смешивается с воздухом топливо в цилиндре мотора. Горючим в моторе служит не уголь, а более сложные вещества, например, бензин. Молекула этого вещества изображена на рис. 7.2

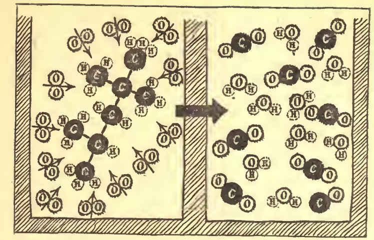


Рис. 7.2.

слева, она состоит из 8 атомов углерода и 18 атомов водорода, соединенных так, как показано на рисунке. При горении эта молекула подвергается ударам кислородных молекул. Встречи с молекулами кислорода разрушают молекулу бензина. Силы, соединяющие в молекуле бензина один или два атома углерода с атомом водорода, а также силы, соединяющие два атома кислорода в молекулу кислорода, не могут противостоять более сильному, как говорят химики, «сродству» между атомами кислорода, с одной стороны, и атомами углерода и водорода — с другой. Поэтому старые связи между атомами молекул нарушаются, атомы перегруппировываются и создают новые молекулы. Как показывает рис. 7.2 справа, новыми молекулами — продуктами горения — и в этом случае являются углекислый газ и вода. Вода при этом образуется в форме пара.

Совершенно иначе обстоит дело в том случае, когда воздушная атмосфера не нужна, а все необходимое для реакции содержится внутри вещества. Примером такого вещества является смесь водорода с кислородом (ее называют гремучим газом). Реакция идет не с поверхности, а происходит внутри вещества. В отличие от случая горения вся энергия, образующаяся при

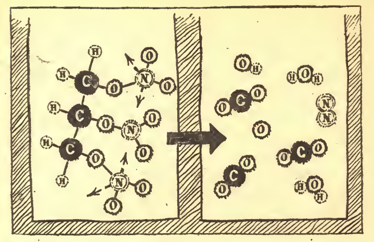


Рис. 7.3.

реакции, отдается почти мгновенно, вследствие этого резко повышается давление и происходит взрыв. Гремучий газ не горит, а взрывается.

Итак, взрывчатое вещество должно содержать внутри себя атомы или молекулы, нужные для реакции. Понятно, что можно приготовить взрывающиеся газовые смеси. Существуют и твердые взрывчатые вещества. Они являются взрывчатыми именно потому, что в их состав входят все атомы, необходимые для химической реакции, дающей тепло и свет.

Химическая реакция, происходящая при взрыве,— это реакция распада, расщепления молекулы на части. На рис. 7.3 показана для примера взрывная реакция — расщепление на части молекулы нитроглицерина. Как видно на правой части схемы, из исходной молекулы образуются молекулы углекислого газа, воды, азота. В составе продуктов реакции мы находим обычные продукты горения, но горение произошло без участия молекул кислорода воздуха — все необходимые для горения атомы содержатся внутри молекулы нитроглицерина.

Как распространяется взрыв по взрывчатому веществу, например гремучему газу? Когда поджигают взрывчатое вещество, возникает местный нагрев. Реакция

происходит в нагретом объеме. Но при реакции выделяется тепло, которое путем теплопередачи переходит в соседние слои смеси. Этого тепла достаточно для того, чтобы и в соседнем слое произошла реакция. Вновь выделившееся тепло поступит в следующие слои гремучего газа, и так со скоростью, связанной с передачей тепла, реакция распространяется по всему веществу. Скорость такой передачи — порядка 20—30 м/с. Разумеется, это очень быстро. Метровая трубка с газом взрывается за 1/20 с, т. е. почти мгновенно, в то время как скорость горения дров или кусков углей, происходящего с поверхности, а не в объеме, измеряется см/мин, т. е. в несколько тысяч раз меньше.

Тем не менее можно назвать и этот взрыв медленным, так как возможен другой взрыв, в сотни раз более быстрый, чем описанный.

Быстрый взрыв вызывается ударной волной. Если в каком-либо слое вещества резко повышается давление, то от этого места начнет распространяться фронт повышенного давления. В этом случае и говорят об ударной волне. Эта волна приводит к значительному скачку температуры, который передается от слоя к слою. Повышение температуры дает начало взрывной реакции, а взрыв приводит к повышению давления и поддерживает ударную волну, интенсивность которой иначе быстро падала бы по мере ее распространения. Таким образом, ударная волна вызывает взрыв, а взрыв в свою очередь поддерживает ударную волну.

Описанный нами взрыв называется детонацией. Так как детонация распространяется по веществу со скоростями ударной волны (порядка 1 км/с), то она действительно быстрее «медленного» взрыва в сотни раз.

Какие же вещества взрываются «медленно», а какие «быстро»? Так ставить вопрос нельзя: одно и то же вещество, находящееся в разных условиях, может и взрываться «медленно» и детонировать, а в некоторых случаях «медленный» взрыв переходит в детонацию.

Некоторые вещества, например иодистый азот, взрываются от прикосновения соломинки, от небольшого нагревания, от световой вспышки. Такое взрывчатое вещество, как тротил, не взрывается, если его уронить, даже если его прострелить из винтовки. Для взрыва требуется сильная ударная волна.

Существуют вещества, еще менее чувствительные к внешним воздействиям. Удобрительная смесь аммиачной селитры и сернокислого аммония не считалась взрывчатой до трагического случая, происшедшего в 1921 г. на немецком химическом заводе в Оппау. Для дробления слежавшейся смеси там был применен взрывной способ. В результате на воздух взлетели склад и весь завод. В несчастье нельзя было упрекать инженеров завода: примерно двадцать тысяч подрывов прошло нормально и лишь один раз создались условия, благоприятные для детонации.

Вещества, которые взрываются лишь под действием ударной волны, а при обычных условиях устойчиво существуют и даже не боятся огня, весьма удобны для техники взрывного дела. Такие вещества можно производить и хранить в больших количествах. Однако для приведения этих инертных взрывчатых веществ в действие нужны зачинатели или, как говорят, инициаторы взрыва. Такие инициирующие взрывные вещества совершенно необходимы как источники ударных волн.

Примером инициирующих веществ может служить азид свинца, или гремучая ртуть. Если крупинку такого вещества положить на лист жести и поджечь, то происходит взрыв, пробивающий в жести отверстие. Взрыв таких веществ в любых условиях детонационный.

Если немного азида свинца поместить на заряд вторичного взрывчатого вещества и поджечь, то взрыв инициатора дает ударную волну, достаточную для детонации вторичного взрывчатого вещества. На практике взрыв производится при помощи капсюля-детонатора (1—2 г инициирующего вещества). Капсюль может быть подожжен на расстоянии, например при помощи длинного шнура (бикфордов шнур); исходящая от капсюля ударная волна взорвет вторичное взрывчатое вещество.

В ряде случаев технике надо бороться с детонационными явлениями. В двигателе автомобильного мотора в обычных условиях происходит «медленный взрыв» смеси бензина с воздухом. Однако иногда возникает и детонация. Ударные волны в моторе как систематическое явление совершенно недопустимы, так как под их действием стенки цилиндров мотора быстро выйдут из строя.

Для борьбы с детонацией в двигателях надо либо применять специальный бензин (так называемый бензин с высоким октановым числом), либо подмешивать в бензин специальные вещества — антидетонаторы, не дающие развиваться ударной волне. Одним из распространенных антидетонаторов является тетраэтилсвинец (ТЭС). Это вещество очень ядовито, и инструкция предупреждает шоферов о необходимости осторожно обращаться с таким бензином.

Детонации нужно избегать при конструировании артиллерийского орудия. Ударные волны не должны образовываться внутри ствола при выстреле, в противном случае орудие выйдет из строя.

ДВИГАТЕЛИ, РАБОТАЮЩИЕ ЗА СЧЕТ ПРЕВРАЩЕНИЯ МОЛЕКУЛ

Человек, живущий в XX в., привык пользоваться разнообразными двигателями, выполняющими за него работу, удесятеряющими его силы.

В самом простейшем случае оказывается выгодным превратить механическую энергию в механическую же, но другого рода. Скажем, заставить ветер или поток воды вращать мельничное колесо.

На гидроэлектростанциях процесс превращения энергии водяного потока в круговое движение турбины является промежуточным. Турбина приводит в движение электрическую машину, которая дает ток. Но о таком преобразовании энергии речь впереди.

Уходят в прошлое паровые двигатели. Паровоз стал музейной редкостью. Слишком уж низкий у тепловой машины коэффициент полезного действия.

Это не значит, что вышли из употребления паровые турбины. Но и там превращение энергии расширяющегося пара в механическое движение колеса является лишь промежуточным этапом. Конечная цель — это получение электроэнергии.

Что же касается самолетов и автомобилей, то заставлять их двигаться с помощью парового котла или паровой турбины явно не имеет смысла: слишком велик будет суммарный вес двигателя и нагревателя в пересчете на одну лошадиную силу.

Но можно избавиться от постороннего нагревателя. В газовой турбине рабочим телом непосредственно являются раскаленные продукты сгорания высокотеплотворного топлива. В этих двигателях человек использует химические реакции, т. е. превращения молекул, для получения энергии. Этим определяются и важные преимущества газовой турбины перед паровой, и большие технические трудности, связанные с обеспечением ее надежной работы.

Преимущества очевидны: камера сгорания для сжигания топлива имеет малые размеры и может быть размещена под кожухом турбины, а продукты сгорания горючей смеси, состоящей, например, из распыленного керосина и кислорода, имеют температуру, недосягаемую для пара. Тепловой поток, образующийся в камере сгорания газовой турбины, очень интенсивен, что дает возможность получить высокий к. п. д.

Но эти преимущества оборачиваются и недостатками. Стальные лопатки турбины работают в струях газа, имеющих температуру до 1200°С и неизбежно насыщенных микроскопическими зольными частицами. Легко себе представить, какие высокие требования приходится предъявлять к материалам, из которых изготовляют газовые турбины.

При попытке же сконструировать газовую турбину мощностью около 200 л. с. для легкового автомобиля пришлось столкнуться с совсем уже своеобразной трудностью: турбина получалась столь малых размеров, что обычные инженерные решения и привычные материалы и вовсе отказались служить. Однако технические трудности уже преодолеваются. Первые автомобили с газовыми турбинами созданы, но трудно сказать будут ли они иметь будущее.

Легче оказалось использовать газовую турбину на железнодорожном транспорте. Локомотивы с газовыми турбинами — газотурбовозы — уже получили права гражданства.

Но широкую дорогу газовой турбине проложили совсем другие двигатели, в которых газовая турбина является хотя и необходимой, но подчиненной составной частью. Речь идет о турбореактивном двигателе — основном в настоящее время типе двигателя в реактивной авиации.

Принцип реактивного двигателя крайне прост. В прочной камере сгорания сжигается горючая смесь; продукты сгорания, имеющие чрезвычайно большую скорость (3000 м/с при сжигании водорода в кислороде, несколько меньше для других видов топлива), выбрасываются через плавно расширяющееся сопло в сторону, противоположную движению. Даже сравнительно небольшие количества продуктов сгорания при таких скоростях уносят из двигателя большой импульс.

С созданием реактивных двигателей люди получили реальную возможность осуществить полеты между планетами.

Большое распространение получили жидкостные реактивные двигатели (ЖРД). В камеру сгорания такого двигателя впрыскивают определенные порции топлива (например, этиловый спирт) и окислителя (обычно жидкий кислород). Смесь сгорает, создавая тягу. В высотных ракетах типа V-2 тяга имеет величину порядка 15 тс. В ракету заливается 8,5 т топлива и окислителя, которые сгорают за 1,5 мин. Эти цифры достаточно красноречивы. ЖРД целесообразны только для полетов на большие высоты или за пределы земной атмосферы. Не имеет смысла заливать в самолет, предназначенный для полетов в нижних слоях атмосферы (до 20 км), где достаточно кислорода, большие количества специального окислителя. Но тогда возникает проблема нагнетания в камеру сгорания громадных количеств воздуха, необходимых для интенсивного горения. Решается эта проблема естественно: часть энергии газовой струи, созданной в камере сгорания, отбирается для вращения мощного компрессора, нагнетающего воздух в камеру.

Мы уже говорили, при помощи какого двигателя можно совершить работу за счет энергии струи раскаленных газов,— конечно, это газовая турбина. Вся система называется турбореактивным двигателем (ТРД) (рис. 7.4). Эти двигатели не имеют конкурентов при полетах со скоростями от 800 до 1200 км/ч.

Для полетов на большие расстояния со скоростью 600—800 км/ч на валу ТРД устанавливают дополнительно обычный авиационный винт. Это — турбовинтовой реактивный двигатель (ТВРД). При скоростях полета около 2000 км/ч или более напор разрываемого

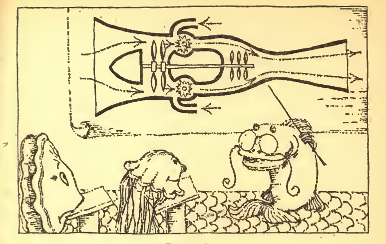


Рис. 7.4.

самолетом воздуха настолько силен, что нужда в компрессоре отпадает. Тогда, естественно, не нужна и газовая турбина. Двигатель превращается в трубу переменного сечения, в строго определенном месте которой происходит сгорание топлива. Это прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД). Ясно, что ПВРД не может поднять самолет с земли, он становится работоспособным лишь при очень высокой скорости полета.

При полетах на малых скоростях реактивные двигатели совершенно нецелесообразны из-за больших расходов горючего.

При движении по земле, воде или в воздухе со скоростями от 0 до 500 км/ч верно служат человеку поршневые двигатели внутреннего сгорания, бензиновые или дизельные. В соответствии с названием главной частью такого двигателя является цилиндр, внутри которого перемещается поршень. Возвратно-поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение вала при помощи шатунно-кривошипной системы (рис. 7.5).

Движение поршня передается через шатун на кривошип, являющийся частью коленчатого вала. Движение кривошипа и вызывает вращение вала. Наоборот, если

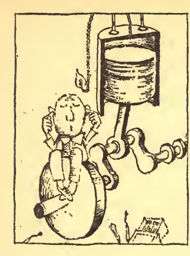


Рис. 7.5.

прокручивать коленчатый вал, то это вызовет качание шатунов и смещение поршней внутри цилиндров.

Цилиндр бензинового двигателя снабжен двумя клапанами, один из которых предназначен для впуска горючей смеси, а другой для выпуска отработанных газов. Для того чтобы двигатель начал работать, его надо прокрутить, используя энергию какого-либо постороннего источника. Пусть в какой-то момент поршень пошел вниз, а впускной клапан открыт. В цилиндр всасывается смесь распыленного бензина и воздуха. Впускной клапан сблокирован с валом двигателя таким образом, что закрывается в тот момент, когда поршень достигает крайнего нижнего положения.

При дальнейшем прокручивании вала поршень идет вверх. Автоматический привод клапанов держит их в течение этого хода закрытыми, поэтому горючая смесь сжимается. Когда поршень находится в верхнем положении, сжатая смесь зажигается электрической искрой, проскакивающей между электродами запальной свечи.

Смесь вспыхивает, расширяющиеся продукты горения работают, с силой посылая поршень вниз. Вал двигателя получает мощный толчок, маховик, сидящий на валу, запасает значительную кинетическую энергию. За счет этой энергии происходят все три последующих подготовительных такта: сначала выпуск, когда выпускной клапан открыт, а поршень идет вверх, выталкивая отработанные газы из цилиндра, потом — известные уже нам всасывание и сжатие, затем — новая вспышка.

Двигатель заработал.

Бензиновые двигатели имеют мощности от долей лошадиной силы до 4000 л. с., к. п. д.— до 40%, вес на лошадиную силу — до 300 гс. Этими хорошими показателями объясняется их широкое применение в автомобилях и самолетах.

Каким образом можно повысить к. п. д. бензинового двигателя? Главный путь — повышение степени сжатия.

Если смесь сжать перед воспламенением сильнее, то ее температура будет выше. А почему важно повысить температуру? Дело в том, что можно строго доказать (доказательство громоздкое и неинтересное, а потому мы его опустим. Читатель неоднократно призывается нами кое когда верить авторам на слово), что максимальное значение к. п. д. равно $1-T/T_0$, где T — температура рабочего тела, а T_0 — температура окружающей среды. Со средой мы ничего поделать не можем, а вот температуру рабочего тела стремимся во всех случаях увеличить возможно больше. Но ...— да, к сожалению, есть «но»,— сильно сжатая смесь детонирует (см. стр. 172). Рабочий ход приобретает характер сильного взрыва, который может повредить двигатель.

Приходится принимать специальные меры, уменьшающие детонационные свойства бензина, а это сильно удорожает и без того не дешевое топливо.

Проблемы повышения температуры при рабочем ходе, устранения детонации и удешевления топлива удачно решены в дизельном двигателе.

Дизельный двигатель по конструкции очень напоминает бензиновый, но рассчитан на более дешевые и низкокачественные продукты перегонки нефти, чем бензин.

Цикл начинается с всасывания в цилиндр чистого воздуха. Затем воздух сжимается поршнем примерно до 20 атм.

Добиться такого сильного сжатия, прокручивая двигатель рукой, было бы очень трудно. Поэтому дизель запускают специальным пусковым мотором, обычно бензиновым, или сжатым воздухом.

При сильном сжатии температура воздуха в цилиндре поднимается настолько, что становится достаточной для воспламенения горючей смеси. Но как впустить ее

в цилиндр, где достигнуто высокое давление? Впускной клапан здесь не годится. Его заменяют форсункой, через крошечное отверстие нагнетающей топливо в цилиндр. Оно воспламеняется по мере поступления, чем устраняется опасность детонации, существенная для бензинового двигателя.

Устранение опасности детонации позволяет строить тихоходные судовые дизели на много тысяч лошадиных сил. Они, естественно, приобретают весьма значительные размеры, но остаются компактнее агрегата из парового котла и турбины. Суда, снабженные дизельными двигателями, без особой логики называются в нашей литературе теплоходами.

Корабль, на котором между дизелем и винтом стоят генератор и мотор постоянного тока, называют «дизель-электроход».

Дизельные локомотивы — тепловозы, широко внедряемые сейчас на железных дорогах,— построены по той же схеме, поэтому их можно называть «дизельэлектровозами».

Поршневые двигатели внутреннего сгорания, рассмотренные нами в последнюю очередь, заимствовали основные конструктивные элементы — цилиндр, поршень, получение вращательного движения при помощи шатунно-кривошипного механизма — у постепенно сходящей сейчас со сцены паровой машины. Паровую машину можно было бы назвать «поршневым двигателем внешнего сгорания». Именно это сочетание громоздкого парового котла с не менее громоздкой системой преобразования поступательного движения во вращательное лишает паровую машину возможности успешно конкурировать с более современными двигателями.

Современные паровые машины имеют к. п. д. около 10%. Снятые сейчас с производства паровозы выпускали в трубу без всякой пользы до 95% сжигаемого ими топлива.

Этот «рекордно» низкий к. п. д. объясняется неизбежным ухудшением свойств парового котла, предназначенного для установки на паровозе, по сравнению со стационарным паровым котлом.

Почему же паровые машины в течение столь долгого времени имели такое широкое применение на транспорте?

Кроме приверженности к привычным решениям, играло роль и то обстоятельство, что паровая машина имеет очень хорошую тяговую характеристику: ведь чем с большей силой сопротивляется нагрузка перемещению поршня, тем с большей силой давит на него пар, т. е. вращающий момент, развиваемый паровой машиной, возрастает в трудных условиях, что и важно на транспорте. Но, разумеется, отсутствие для паровой машины необходимости в сложной системе переменных передач к ведущим осям ни в коей мере не искупает ее коренного порока — низкого к. п. д.

Этим и объясняется вытеснение паровой машины другими двигателями.

Глава 8

ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ НА ЯЗЫКЕ МОЛЕКУЛ

Законы термодинамики относятся к числу великих законов природы. Таких законов немного. Их можно пересчитать по пальцам одной руки.

Основная цель науки, и в том числе, конечно, физики, состоит в поисках правил, закономерностей, общих законов, великих законов, которым подчиняется природа. Этот поиск начинается с наблюдения или эксперимента. Поэтому мы говорим, что все наши знания носят эмпирический или опытный характер. За наблюдениями следует поиск обобщений. Путем настойчивого труда, размышлений, вычислений и озарения находятся законы природы. После этого следует третий этап: строгий логический вывод из этих общих законов следствий и частных законов, которые могут быть проверены на опыте. В этом, кстати говоря, и состоит объяснение явления. Объяснить — это значит подвести частное под общее.

Разумеется, мечтой науки является сведение законов к минимальному числу постулатов. Физики неустанно ищут такие возможности, стараются в нескольких строках элегантными формулами выразить всю сумму наших знаний о природе. Примерно тридцать лет Альберт Эйнштейн пытался объединить законы гравитационного и электромагнитного полей. Удастся ли достигнуть этой цели, покажет будущее.

Что же это за законы термодинамики? Краткое определение, как правило, страдает неточностью. Но, пожалуй, ближе всего к сути дела мы окажемся, если

скажем, что термодинамика есть учение о правилах, согласно которым тела обмениваются энергией. Однако сведения о законах (или как их иногда называют — началах) термодинамики позволяют уже строго логическим (математическим путем) найти связи между тепловыми и механическими свойствами тел, разрешают установить ряд важнейших закономерностей, касающихся изменения состояния тел. Так что, пожалуй, наиболее точным определением этой интересующей нас главы физики будет тривиальная фраза: термодинамика это совокупность знаний, которые следуют из первого и второго начал термодинамики.

Первое начало термодинамики было записано в краткой и выразительной форме еще тогда, когда физики предпочитали не говорить о молекулах. Такого типа формулировки (которые не требуют от нас «залезать» во внутрь тела) носят название феноменологических, т. е. в точном переводе «относящихся к явлению». Первое начало термодинамики является некоторым уточнением и расширением закона сохранения энергии.

Мы установили, что тела обладают кинетической и потенциальной энергиями и что в замкнутой системе сумма этих энергий — полная энергия — не может ни исчезать, ни появляться. Энергия сохраняется.

Если не говорить о движении небесных тел, то, пожалуй, можно без преувеличения сказать, что нет таких явлений, в которых механическое движение не сопровождалось бы нагреванием или охлаждением окружающих тел. Когда тело благодаря трению остановилось, его кинетическая энергия на первый взгляд пропала. Однако это лишь на первый взгляд. На самом же деле можно доказать, что сохранение имеет место с абсолютной точностью: механическая энергия тела ушла на нагрев среды. Но что это значит на языке молекул? А вот что: кинетическая энергия тела перешла в кинетическую энергию молекул.

Ну хорошо, а что происходит в том случае, если мы в ступке толчем лед. Термометр все время показывает нуль. Казалось бы, механическая энергия исчезла. Куда же она делась в этом случае? И здесь ответ нам ясен: лед превратился в воду. Значит, механическая энергия пошла на разрыв связей между молекулами, изменилась внутренняя энергия молекул. Каждый раз, когда

мы замечаем, что механическая энергия тел исчезла, то без труда обнаруживаем, что это нам только кажется, а на самом деле механическая энергия перешла во внутреннюю энергию тел.

В замкнутой системе одни тела могут терять, а другие — приобретать внутреннюю энергию. Но сумма внутренней энергии всех тел, сложенная с механической энергией, остается постоянной для данной системы.

Теперь оставим механическую энергию без внимания. Рассмотрим два момента времени. В первый момент тела покоились, потом происходили какие-то события, а теперь тела снова покоятся. Мы уверены в том, что внутренняя энергия всех тел, входивших в систему, осталась неизменной. Но одни тела потеряли энергию, другие приобрели. Это могло произойти двумя путями. Либо одно тело совершило над другим механическую работу (допустим, сжало его или растянуло), либо одно тело передало другому тепло.

Первое начало термодинамики утверждает: изменение внутренней энергии тела равно сумме сообщенной ему работы и переданного ему тепла.

Тепло и работа являются двумя различными формами, в которых энергия может передаваться от одного тела к другому. Передача тепла происходит беспорядочными ударами молекул. Передача механической энергии состоит в том, что молекулы одного тела стройно, двигаясь «шеренгами», передают свою энергию другому телу.

КАК ПРЕВРАТИТЬ ТЕПЛО В РАБОТУ?

В этом заголовке мы несколько небрежно пользуемся сейчас словом тепло. Как только что было сказано, тепло есть форма передачи энергии. Поэтому правильнее было бы поставить вопрос так: как превратить тепловую энергию, т. е. кинетическую энергию движения молекул, в работу. Но слово «тепло» привычное, краткое и выразительное. Надеемся, что читателя не смутит, если мы будем пользоваться им в том смысле, который сейчас был точно определен.

Тепла вокруг нас не занимать стать. Но, увы, вся эта энергия движения молекул совершенно бесполезна:

она не может быть превращена в работу. Такую энергию никак нельзя причислить к нашим энергетическим запасам. Разберемся в этом.

Отклоненный от положения равновесия маятник рано или поздно остановится; запущенное от руки колесо перевернутого велосипеда сделает много оборотов, но в конце концов тоже прекратит движение. Нет исключения из важного закона: все окружающие нас тела, движущиеся самопроизвольно, в конце концов остановятся *).

Если имеется два тела — нагретое и холодное, то тепло будет передаваться от первого ко второму до тех пор, пока температуры не уравняются. Тогда теплопередача прекратится, состояния тел перестанут изменяться. Установится тепловое равновесие.

Нет такого явления, при котором тела самопроизвольно выходили бы из состояния равновесия. Не может быть такого случая, чтобы колесо, сидящее на оси, начало бы вертеться само по себе. Не бывает и так, чтобы нагрелась сама по себе стоящая на столе чернильница.

Стремление к равновесию означает, что у событий имеется естественный ход: тепло переходит от горячего тела к холодному, но не может самопроизвольно перейти от холодного тела к горячему.

Механическая энергия колеблющегося маятника благодаря сопротивлению воздуха и трению в подвесе перейдет в тепло. Однако ни при каких условиях маятник не начнет раскачиваться за счет тепла, имеющегося в окружающей среде. Тела приходят в состояние равновесия, но самопроизвольно выйти из него не могут.

Этот закон природы сразу же показывает, какая часть находящейся вокруг нас энергии совершенно бесполезна. Это энергия теплового движения молекул тех тел, которые находятся в состоянии равновесия. Такие тела не способны превратить свою энергию в механическое движение.

Эта часть энергии огромна. Подсчитаем величину этой «мертвой» энергии. Если понизить температуру на 1 градус, то килограмм земли, имеющий теплоем-

*) Здесь, разумеется, не имеются в виду равномерное поступательное движение и равномерное вращение изолированной системы тел как целого.

кость 0,2 ккал/кг, потеряет 0,2 ккал. Относительно небольшая цифра. Однако прикинем, какую энергию мы получили бы, если бы удалось охладить всего лишь на один градус такое вещество в массе земного шара, равной $6 \cdot 10^{24}$ кг. Умножая, мы получим грандиозную цифру: $1,2 \cdot 10^{24}$ ккал. Чтобы вы могли представить эту величину, скажем тут же, что в настоящее время энергия, вырабатываемая ежегодно электростанциями всего мира, равна 10^{15}—10^{16} ккал, т. е. в миллиард раз меньше.

Не приходится удивляться, что подобного рода расчеты действуют гипнотически на малосведущих изобретателей. Мы говорили раньше о попытках построения вечного двигателя («перпетуум мобиле»), создающего работу из ничего. Оперируя положениями физики, вытекающими из закона сохранения энергии, невозможно опровергнуть этот закон созданием вечного двигателя (теперь мы назовем его вечным двигателем первого рода).

Такую же ошибку совершают и несколько более хитроумные изобретатели, которые создают конструкции двигателей, производящих механическое движение за счет одного лишь охлаждения среды. Этот, увы, неосуществимый двигатель называют вечным двигателем второго рода. И здесь совершается логическая ошибка, поскольку изобретатель основывается на законах физики, являющихся следствием закона о стремлении всех тел к состоянию равновесия, и при помощи этих законов пытается опровергнуть основания, на которых они зиждятся.

Итак, одним лишь отнятием тепла у среды нельзя произвести работу. Другими словами, система тел, находящихся в равновесии друг с другом, энергетически бесплодна.

Значит, для получения работы необходимо прежде всего найти тела, не находящиеся в равновесии со своими соседями. Только тогда удастся осуществить процесс перехода тепла от одного тела к другому или превращения тепла в механическую энергию.

Создание потока энергии — вот необходимое условие получения работы. На «пути» этого потока возможно превращение энергии тел в работу. Поэтому к энергетическим запасам, полезным для людей, относится

энергия лишь тех тел, которые не находятся в равновесии с окружающей средой.

Закон, который мы разъяснили — невозможность создания вечного двигателя второго рода,— называется вторым началом термодинамики. Пока мы его выразили в виде феноменологического правила. Но так как мы знаем, что тела построены из молекул, и знаем, что внутренняя энергия есть сумма кинетической и потенциальной энергии молекул, то нам не очень ясно с чего это вдруг появился какой-то «дополнительный» закон. Почему закона сохранения энергии, сформулированного для молекул, недостаточно, чтобы разобраться во всех природных явлениях?

Короче говоря, напрашивается вопрос, а, собственно говоря, почему молекулы ведут себя так, что предоставленные сами себе стремятся к равновесию?

ЭНТРОПИЯ

Вопрос этот очень важен и интересен. Чтобы ответить на него, придется начать издалека.

Обыденные, часто встречающиеся случаи происходят на каждом шагу, они вероятны. Напротив, невероятными случаями считают события, которые произошли благодаря редкому стечению обстоятельств.

Невероятное событие не требует проявления каких бы то ни было сверхъестественных сил. В нем нет ничего невозможного, ничего противоречащего законам природы. И все же во многих случаях мы совершенно убеждены в том, что невероятное практически тождественно невозможному.

Рассмотрите выигрышную таблицу лотереи. Подсчитайте, сколько билетов имеют номера, которые заканчиваются цифрой 4, или 5, или 6. Вы нисколько не удивитесь, когда найдете, что каждой цифре соответствует примерно десятая часть выигравших облигаций.

Ну, а может быть, чтобы билетов с номерами, заканчивающимися цифрой 5, было бы не одна десятая, а одна пятая часть? Маловероятно, скажете вы. Ну, а так, чтобы половина выигравших билетов имела такие номера? Нет, это совершенно невероятно..., а значит, и невозможно.

Размышляя над тем, какие же условия нужны, чтобы событие было вероятным, мы приходим к следующему выводу: вероятность события зависит от числа способов, которыми оно может быть осуществлено. Чем больше число способов, тем чаще будет происходить такое событие.

Точнее, вероятность есть отношение числа способов осуществления данного события к числу способов осуществления всех возможных событий.

Напишите цифры от 0 до 9 на десяти картонных кружках, положите их в мешочек. Теперь вытаскивайте кружок, замечайте номер, а кружок кладите обратно. Это очень похоже на розыгрыш лотереи. Можно с уверенностью сказать, что одну и ту же цифру вы не вытянете подряд, скажем, 7 раз, даже если посвятите этому скучному занятию целый вечер. Почему? Вытаскивание семи одинаковых цифр — это одно событие, осуществляемое всего десятью способами (7 нулей, 7 единиц, 7 двоек и т. д.). А всего есть 10^7 возможностей вытащить семь кружков. Поэтому вероятность вытащить подряд семь кружков с одинаковыми цифрами равна $10/10^7 = 10^{-6}$, т. е. всего одной миллионной.

Если насыпать в ящичек черные и белые зернышки и перемешать их лопаткой, то очень скоро зерна распределятся равномерно по всему ящичку. Зачерпнув наудачу горсть зерен, мы найдем в ней примерно одинаковое число белых и черных зернышек. Сколько бы мы ни перемешивали их, результат будет все время тем же — равномерность сохранится. Но почему не происходит разделения зерен? Почему долгим перемешиванием не удастся загнать черные зерна кверху, а белые книзу? И здесь все дело в вероятности. Такое состояние, при котором зерна распределены беспорядочно, т. е. черные и белые равномерно перемешаны, может быть осуществлено огромным множеством способов и, следовательно, обладает самой большой вероятностью. Напротив, такое состояние, при котором все белые зерна наверху, а черные внизу, единственно. Поэтому вероятность его осуществления ничтожно мала.

От зернышек в мешочке мы легко перейдем к молекулам, из которых построены тела. Поведение молекул подчиняется случаю. Это особенно ярко видно на примере газов. Как мы знаем, молекулы газа беспорядоч-

но сталкиваются, движутся во всех возможных направлениях то с одной, то с другой скоростью. Это вечное тепловое движение непрерывно перетасовывает молекулы, перемешивает их так, как это делает лопатка с зернышками в ящике.

Комната, в которой мы находимся, заполнена воздухом. Почему в какой-либо момент не может случиться так, что молекулы из нижней половины комнаты перейдут в верхнюю половину — под потолок? Такой процесс не невозможен — он очень невероятен. Но что значит очень невероятен? Если бы такое явление было даже в миллиард раз менее вероятно, чем беспорядочное распределение молекул, то все-таки кто-нибудь смог бы его дождаться. Может быть, мы и дождемся такого явления?

Расчет показывает, что такое событие встречается для сосуда объемом 1 см³ одно на $10^{30000000000000000000}$ раз. Вряд ли стоит делать различие между словами «крайне невероятное» и «невозможное». Ведь число, которое написано, невообразимо огромно; если его поделить на число атомов не только на земном шаре, но и во всей солнечной системе, то оно все равно останется огромным.

Какое же будет состояние молекул газа? Наиболее вероятное. А наиболее вероятным будет состояние, осуществимое наибольшим числом способов, т. е. беспорядочное распределение молекул, при котором имеется примерно одинаковое число молекул, движущихся вправо и влево, вверх и вниз, при котором в каждом объеме находится одинаковое число молекул, одинаковая доля быстрых и медленных молекул в верхней и нижней частях сосуда. Любое отклонение от такого беспорядка, т. е. от равномерного и беспорядочного перемешивания молекул по местам и по скоростям, связано с уменьшением вероятности, или, короче, представляет собой невероятное событие.

Напротив, явления, связанные с перемешиванием, с созданием беспорядка из порядка, увеличивают вероятность состояния. Эти явления и будут определять естественный ход событий. Закон о невозможности вечного двигателя второго рода, закон о стремлении всех тел к равновесному состоянию, получает свое объяснение. Почему механическое движение переходит в тепловое? Да потому, что механическое движение упо-

рядочено, а тепловое беспорядочно. Переход от порядка к беспорядку повышает вероятность состояния.

Величину, характеризующую степень порядка и связанную простой формулой с числом способов создания состояния, физики назвали энтропией. Формулы приводить не будем, скажем лишь, что чем больше вероятность, тем больше и энтропия.

Закон природы, который мы сейчас обсуждаем, говорит: все естественные процессы происходят так, что вероятность состояния возрастает. Другими словами, тот же закон природы формулируется как закон возрастания энтропии.

Закон возрастания энтропии — важнейший закон природы. Из него вытекает, в частности, и невозможность построения вечного двигателя второго рода, или, что то же самое, утверждение, что предоставленные сами себе тела стремятся к равновесию. Закон возрастания энтропии является тем же вторым началом термодинамики, другая — только формулировка, но содержание то же. А самое главное: мы дали второму началу термодинамики трактовку на языке молекул.

В некотором смысле объединение этих двух законов под одну шапку не вполне удачно. Закон сохранения энергии — закон абсолютный. Что же касается закона возрастания энтропии, то, как следует из сказанного выше, он применим лишь к достаточно большому собранию частиц, а для отдельных молекул его просто невозможно сформулировать.

Статистический (это и обозначает относящийся к большому собранию частиц) характер второго начала термодинамики нисколько не принижает его значения. Закон возрастания энтропии предопределяет направление процессов. В этом смысле энтропию можно назвать директором-распорядителем природных богатств, а энергия служит у нее бухгалтером.

ФЛУКТУАЦИИ

Итак, самопроизвольные процессы ведут систему к наиболее вероятному состоянию — к возрастанию энтропии. После того как энтропия системы стала максимальной, наступает равновесие.

Но это вовсе не означает, что молекулы приходят в состояние покоя. Внутри системы идет интенсивная жизнь. Поэтому, строго говоря, любое физическое тело каждое мгновение «перестает быть самим собой», взаимное расположение молекул в каждое последующее мгновение не такое, как в предыдущее. Таким образом, значения всех физических величин сохраняются «в среднем», они не строго равны своим наиболее вероятным значениям, а колеблются около них. Отклонение от равновесных наиболее вероятных значений называется флуктуацией. Величины разных флуктуаций крайне незначительны. Чем больше величина флуктуации, тем она менее вероятна.

Среднее значение относительной флуктуации, т. е. доли интересующей нас физической величины, на которую эта величина может измениться благодаря тепловым хаотическим движениям молекул, может быть примерно представлено выражением $1/\sqrt{N}$, где N — число молекул изучаемого тела или его участка. Таким образом, флуктуации заметны для систем, состоящих из небольшого числа молекул, и совсем незаметны для больших тел, содержащих миллиарды миллиардов молекул.

Формула $1/\sqrt{N}$ показывает, что в одном кубическом сантиметре газа плотность, давление, температура, а также любые другие свойства могут меняться на долю $1/\sqrt{3\cdot 10^{19}}$, т. е. примерно в пределах $10^{-8}\%$. Такие флуктуации слишком малы, чтобы можно было обнаружить их опытом. Однако совсем иначе обстоит дело в объеме кубического микрометра. Здесь $N=3\cdot 10^7$ и флуктуации будут достигать измеримых величин порядка уже сотых долей процента.

Флуктуация представляет собой «ненормальное» явление в том смысле, что она приводит к переходам от более вероятного состояния к менее вероятному. Во время флуктуации тепло переходит от холодного тела к горячему, нарушается равномерное распределение молекул, возникает упорядоченное движение.

Может быть, на этих нарушениях удастся построить вечный двигатель второго рода?

Представим себе, например, крошечную турбинку, находящуюся в разреженном газе. Нельзя ли устроить

так, чтобы эта маленькая машина откликалась на все флуктуации какого-либо одного направления? Например, поворачивалась бы, если бы число молекул, летящих вправо, становилось больше числа молекул, движущихся влево. Такие маленькие толчки можно было бы складывать, и в конце концов совершилась бы работа. Принцип невозможности вечного двигателя второго рода был бы опровергнут.

Но, увы, подобное устройство принципиально невозможно. Подробное рассмотрение, учитывающее, что турбинка имеет свои собственные флуктуации, тем бо́льшие, чем меньше ее размеры, показывает, что флуктуации вообще не могут произвести какую бы то ни было работу. Хотя нарушения стремления к равновесию возникают беспрерывно вокруг нас, они не могут изменить неумолимого хода физических процессов в сторону, увеличивающую вероятность состояния, т. е. энтропию.

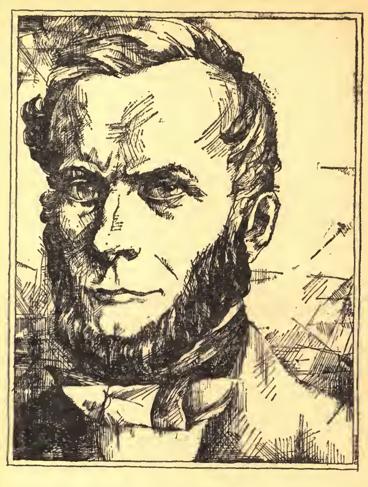
КТО ОТКРЫЛ ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ?

Здесь нельзя ограничиться одним именем. У второго начала термодинамики есть своя история.

И здесь, так же как в истории первого начала термодинамики, в первую очередь должно быть упомянуто имя француза Сади Карно. В 1824 г. он издал на свои средства печатный труд под названием «Размышления о движущей силе огня». В этой работе впервые было указание, что тепло не может переходить от холодного тела к теплому без затраты работы. Карно показал также, что максимальный коэффициент полезного действия тепловой машины определяется лишь разностью температур нагревателя и охлаждающей среды.

Только после смерти Карно в 1832 г. на эту работу обратили внимание другие физики. Однако она мало повлияла на дальнейшее развитие науки из-за того, что все сочинение Карно было построено на признании неразрушимого и несоздаваемого «вещества» — теплорода.

Только после работ Майера, Джоуля и Гельмгольца, установивших закон эквивалентности тепла и работы,



РУДОЛЬФ КЛАУЗИУС (1822—1888) — выдающийся немецкий физик-теоретик. Клаузиус впервые четко сформулировал второй закон термодинамики: в 1850 г.— в виде положения о невозможности самопроизвольной передачи теплоты от более холодного тела к более теплому, а в 1865 г.— с помощью введенного им же понятия энтропии. Одним из первых Клаузиус обратился к вопросам о теплоемкости многоатомных газов и теплопроводности газов. Работы Клаузиуса по кинетической теории газов способствовали развитию статистических представлений о физических процессах. Клаузиусу принадлежит ряд интересных работ по электрическим и магнитным явлениям.

великий немецкий физик Рудольф Клаузиус (1822—1888) пришел ко второму началу термодинамики и математически сформулировал его. Клаузиус ввел в рассмотрение энтропию и показал, что сущность второго начала термодинамики сводится к неизбежному росту энтропии во всех реальных процессах.

Второе начало термодинамики позволяет сформулировать ряд общих законов, которым должны подчиняться все тела, как бы они ни были построены. Однако остается еще вопрос, как найти связь между строением тела и его свойствами? На этот вопрос отвечает область физики, которая называется статистической физикой.

Ясно, что при подсчете физических величин, описывающих систему, состоящую из миллиардов миллиардов частиц, совершенно необходим новый подход. Ведь было бы бессмысленно, не говоря уже о том, что и абсолютно невозможно, следить за движениями всех частиц и описывать это движение с помощью формул механики. Однако именно это огромное количество частиц позволяет применить к изучению тел новые «статистические» методы. Эти методы широко используют понятие вероятности событий. Основы статистической физики были заложены замечательным австрийским физиком Людвигом Больцманом (1844—1906). В серии работ Больцман показал, каким образом указанная программа может быть осуществлена для газов.

В 1877 г. логическим завершением этих исследований явилось данное Больцманом статистическое истолкование второго начала термодинамики. Формула, связывающая энтропию и вероятность состояния системы, высечена на памятнике Больцману.

Трудно переоценить научный подвиг Больцмана, нашедшего в теоретической физике совершенно новые пути. Исследования Больцмана подвергались при его жизни насмешкам со стороны консервативной немецкой профессуры: в то время атомные и молекулярные представления считались многими наивными и ненаучными. Больцман покончил жизнь самоубийством, и обстановка, несомненно, сыграла в этом далеко не последнюю роль.

Здание статистической физики было в значительной степени завершено трудами выдающегося американского физика Джозайи Уилларда Гиббса (1839—1903). Гиббс

обобщил методы Больцмана и показал, каким образом можно распространить статистический подход на все тела.

Последняя работа Гиббса вышла в свет уже в начале XX в. Очень скромный исследователь, Гиббс печатал свои труды в известиях небольшого провинциального университета. Прошло порядочное число лет, пока его замечательные исследования сделались известными всем физикам.

Статистическая физика показывает путь, следуя по которому можно вычислить свойства тел, состоящих из данного количества частиц. Конечно, не следует думать, что эти методы расчета всемогущи. Если характер движения атомов в теле очень сложен, как это имеет место в жидкостях, то реальное вычисление становится практически неосуществимым.

Глава 9

БОЛЬШИЕ МОЛЕКУЛЫ

ЦЕПОЧКИ АТОМОВ

С природными веществами, состоящими из длинных молекул, в которых атомы связаны наподобие звеньев цепочки, химики и технологи имели дело давно. За примерами далеко ходить не надо: столь распространенные вещества, как каучук, целлюлоза, белок представляют собой цепочечные молекулы, состоящие из многих тысяч атомов. Структурные представления о таких молекулах возникли и развились в двадцатых годах, когда химики научились готовить их в лаборатории.

Одним из первых шагов в получении веществ, построенных из длинных молекул, было создание искусственного каучука. Эта великолепная работа была выполнена в 1926 г. советским химиком Сергеем Васильевичем Лебедевым. Задача получения каучука, который был остро необходим для изготовления автомобильных шин (резина ведь готовится из каучука), была продиктована тем, что природного каучука в Союзе не имеется.

В бразильских джунглях растет дерево гевея, источающее латекс — млечный сок, взвесь каучука. Индейцы делали из каучука мячи, пользовались им для создания обуви. Но в 1839 г. европейцы научились вулканизировать каучук. При обработке каучука серой вместо липкого и текучего каучука получалась эластичная резина.

Сначала ее потребление было небольшим. Сейчас человечеству нужны миллионы тонн каучука в год. Гевея растет только в тропических лесах. Так что,

если освобождаться от импорта, то надо готовить каучук на заводах.

Для этого требуется, конечно, знать, что же такое каучук. К началу работ Лебедева химическая формула каучука была известна. Вот она

$$\cdots CH_2-CH_2 \diagup\diagdown C=CH \cdots \quad \text{(цепочка звеньев } -CH_2-C(CH_3)=CH-CH_2-)$$

Нарисованная здесь цепочка не имеет ни начала, ни конца. Мы видим, что молекулы построены из одинаковых звеньев. Поэтому можно коротко записать формулу каучука в таком виде:

$$\left[-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}=CH-CH_2-\right]_n.$$

Число n достигает многих тысяч. Длинные молекулы, построенные из повторяющихся звеньев, получили название полимеров.

Теперь в технике и текстильной промышленности имеют широчайшее распространение очень большое число синтетических полимеров. К ним относятся нейлон, полиэтилен, капрон, полипропилен, полихлорвинил и многие другие.

Наиболее просто построена молекула полиэтилена. Мешочки из этого материала лежат теперь в ящиках кухонного стола в каждой квартире. Если предельно вытянуть молекулу полиэтилена, то она будет иметь вид, показанный на рис. 9.1. Как видите, физики сумели определить расстояния между атомами и углы между валентными связями.

Длинные молекулы не обязательно являются полимерами, т. е. не обязательно состоят из повторяющихся звеньев. Химики научились «конструировать» молекулы, построенные из двух или более разных звеньев. Если эти звенья чередуются в определенном порядке, скажем по схеме ABABABABAB, то за такой молекулой уместно сохранить название полимер. Но часто мы имеем дело с молекулами, где нет такой закономерности следования. Можно ли назвать молекулу ABBBA-

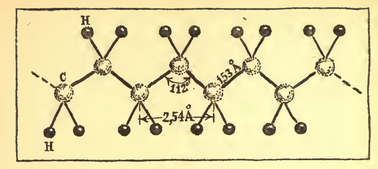


Рис. 9.1.

ВАВАААВВВВАВАВААВВА полимерной? Впрочем, это дело вкуса и о названиях не спорят.

Естественную молекулу белка редко называют полимером. Белки построены из 20 кусочков разного сорта. Эти кусочки называются аминокислотными остатками.

Между молекулами белков и синтетическими молекулами, построенными из нескольких кусочков, расположенных в беспорядке, имеется одно существенное различие. В куске синтетического полимера нет двух одинаковых молекул. Беспорядочное следование кусочков, из которых состоит цепочечная молекула, в одной молекуле — одно, а в другой — другое. В большинстве случаев это обстоятельство влияет отрицательно на свойства полимера. Раз молекулы непохожи друг на друга, то они не могут хорошо упаковаться. Из таких молекул в принципе нельзя построить кристалл. Вещества этого типа дают аморфные стекла.

В последние десятилетия химики научились строить регулярные полимеры, и промышленность получила в свое распоряжение много новых ценных материалов.

Что же касается природных белков определенного сорта (скажем, гемоглобина быка), то их молекулы хоть и построены беспорядочно, но они все одинаковые. Молекулу белка данного сорта можно сравнить со страницей книги: буквы следуют друг за другом в случайном, но вполне определенном порядке. Все молекулы белка — это копии одной и той же страницы.

ГИБКОСТЬ МОЛЕКУЛ

Длинную молекулу можно сравнить с рельсом. На длине 0,1 мм уместится 10^6 атомов. Поперечные размеры молекулы полиэтилена что-нибудь около 3—4 Å. Так что длина молекулы больше ее поперечного сечения в сотни тысяч раз. Так как рельс имеет толщину около 10 см, то зрительным образом длинной молекулы будет рельс длиной 10 км.

Это не значит, конечно, что не приходится иметь дело с короткими молекулами. Вообще, если не принять специальных мер, то в полимерном веществе мы найдем молекулы разной длины — от таких, которые состоят из нескольких звеньев, до таких, которые построены из тысяч звеньев.

Итак, длинная молекула похожа на рельс. Похожа, но не совсем. Рельс согнуть трудно, а длинная молекула гнется легко. Гибкость макромолекулы не похожа на гибкость ивового прута. Она возникает из-за особой

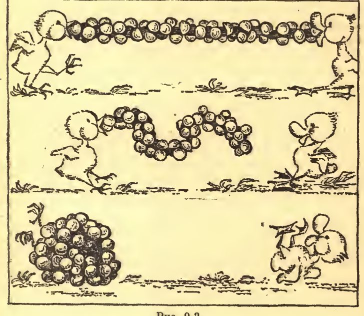


Рис. 9.2.

способности всех молекул: одна часть молекулы может вращаться около другой части, если они соединены связями, которые химики называют одинарными (одновалентными). Нетрудно сообразить, что благодаря этому свойству полимерные молекулы могут принять самые причудливые формы. На рис. 9.2 показана модель гибкой молекулы в трех положениях. Если молекула плавает в растворе, то она большей частью сворачивается в клубок.

Растяжение резинового шнура представляет собой разворот молекулы. Так что упругость полимеров имеет совсем другую природу, чем упругость металлов. Если растянутый шнур отпустить, то он сократится. Значит, молекула стремится из линейной формы перейти в клубкообразную. В чем причина? Их могут быть две. Во-первых, можно допустить, что состояние клубка энергетически более выгодно, во-вторых, можно предположить, что сворачивание содействует возрастанию энтропии. Итак, какой закон термодинамики командует этим поведением: первый или второй? Надо думать, что оба. Но без сомнения состояние клубка выгодно и с точки зрения энтропии. Ведь чередование атомов молекулы, свернутой в клубок, более беспорядочно, чем в вытянутой молекуле. А мы знаем, что беспорядок и энтропия находятся в близком родстве.

ГЛОБУЛЯРНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Способность сворачиваться в клубок, или, как часто говорят, в глобулу, свойственна многим молекулам. Очень аккуратные и вполне тождественные друг другу глобулы создают молекулы белка. Тут есть одна тонкая причина. Дело в том, что молекула белка содержит части, которые «любят» воду и такие кусочки, которые относятся к воде отрицательно. Кусочки, не любящие воду, называют гидрофобными. Сворачивание молекулы белка диктуется одним стремлением: все гидрофобные части должны спрятаться внутрь глобулы. Именно это и приводит к тому, что в растворе белка плавают глобулы, похожие друг на друга, как близнецы.

Белковые глобулы более или менее шарообразны. Глобула имеет размер 100—300 Å, так что увидеть ее

в электронный микроскоп совсем нетрудно. Первые электронно-микроскопические картинки глобулярных кристаллов были получены несколько десятков лет тому назад, когда техника электронной микроскопии была еще весьма слабой. На рис. 9.3 приведена такая фотография для вируса табачной мозаики. Вирус посложнее белка, но для иллюстрации нашей мысли — стремления биологических глобул расположиться с высоким порядком — этот пример вполне подходит.

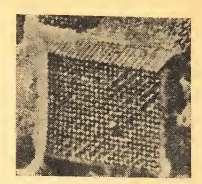


Рис. 9.3.

Но почему авторы не приводят картины белкового кристалла? Дело вот в чем. Белковые кристаллы являются кристаллами совершенно необычными. Они содержат огромный процент воды (иногда до 90%). Это делает их съемку в электронном микроскопе невозможной. Исследование белковых кристаллов можно производить, лишь манипулируя ими в растворе. Тонюсенькая колбочка содержит раствор и монокристалл белка. Этот объект можно изучать всеми физическими методами, в том числе и с помощью рентгеноструктурного анализа, о котором мы уже неоднократно упоминали.

Несмотря на огромное количество воды — самой обыкновенной воды, ничуть не отличающейся от водопроводной,— глобулярные молекулы белков расположены в совершенно строгом порядке. Их ориентация к осям кристалла одинакова для всех молекул. А то, что сами молекулы тождественны, мы уже сказали выше. Этот превосходный порядок позволяет определить структуру белковой молекулы. Задача эта очень нелегкая и исследователь Перутц, который первый в мире определил структуру белка (это был гемоглобин), получил за свою работу Нобелевскую премию.

В настоящее время известна структура около сотни белковых молекул. Работа продолжается. Всего в живом

организме имеется около десятка тысяч различных белков. От того, как они свернуты, и в каком порядке следуют друг за другом разные аминокислотные остатки, зависит деятельность живого организма. Нет сомнения, что работа по определению структуры белковых молекул будет продолжаться до тех пор, пока не будет получена полная ясность в отношении всех десяти тысяч сортов молекул, определяющих жизненные процессы.

ПАЧКИ МОЛЕКУЛ

Если молекулы могут хорошо упаковаться, будучи предельно растянуты, то твердый полимерный материал может образовать разные довольно сложные структуры, обладающие, однако, одним общим свойством. В той или иной степени в твердом теле будут присутствовать участки, в которых молекулы примыкают друг к другу, как карандаши в пачке.

В зависимости от того, каков в теле процент таких пачечных участков, а также смотря по тому, сколь аккуратно упакованы молекулы, составляющие пачечный участок, полимер может обладать тем или иным «процентом кристалличности». Большинство полимеров противятся простой классификации твердых тел на аморфные и кристаллические. Удивительного в этом ничего нет, поскольку речь идет об огромных, да еще вдобавок чаще всего неодинаковых молекулах. Упорядоченные («кристаллические») участки в полимерах можно грубо разбить на три класса: пачки, сферолиты и кристаллы из складывающихся молекул.

Типичная микроструктура полимера показана на рис. 9.4. Это фотоснимок с увеличением в 400 раз, сделанный с пленки полипропилена. Звездообразные фигурки — это своего рода кристаллиты. Из центра звездочки при охлаждении полимера начался рост сферолита. Затем сферолиты встретились и поэтому не приобрели идеальной сферической формы (если удается наблюдать за ростом отдельного сферолита, то действительно видишь шар, так что название «сферолит» вполне оправдано). Внутри сферолита длинные молекулы уложены достаточно аккуратно. Скорее всего, сферолит можно представить себе, как аккуратно сложенный



Рис. 9.4.

канат. Роль каната играет пачка молекул. Таким образом, своей длинной осью молекулы расположены перпендикулярно к радиусу сферолита. На той же фотографии мы видим пластинчатые участки. Возможно, это пачки молекул, а может быть, и кристаллы из складывающихся молекул. Существование подобных кристаллов, пожалуй, является интересным и абсолютно достоверным фактом, относящимся к структуре полимеров.

Двадцать лет назад было сделано следующее замечательное открытие. Из раствора были выделены кристаллики различных полимерных веществ. Исследователи были поражены тем, что такие же кристаллики, поверхности которых похожи на спиральную лестницу, вырастали из растворов различных парафинов. В чем же причина этого спирального роста кристаллов, напоминающего результаты труда искусного кондитера (рис. 9.5)?

Говоря о росте кристалла на стр. 99, мы обошли одно обстоятельство. Представим себе, что строящаяся плоскость кристалла заполнена атомами. Тогда не остается мест, которые притягивали бы атомы достаточно сильно. Можно подсчитать, что по такой схеме рост должен идти со скоростями, в немыслимое число раз меньшими, чем скорости роста, наблюдаемые в действительности. Выход из положения дает наличие

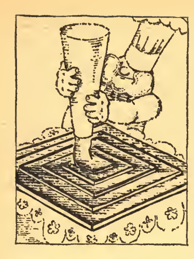


Рис. 9.5.

спиральных дислокаций в кристалле. Если есть спиральная дислокация, то наращивание грани идет таким образом, что ступеньки, на которых атомам выгодно занять место, никогда не зарастут. Физики облегченно вздохнули, когда были обнаружены спиральные дислокации. Им стали понятны величины скоростей роста и стала очевидной суть картинок, подобных приведенной выше для парафина. Такие спиральные пирамидки наблюдаются очень часто, и в том, что они существуют, нет ничего удивительного.

Нет удивительного, если речь идет о кристаллах, построенных из малых молекул. Для таких кристаллов объяснение проходит: размер молекулы, высота ступеньки, толщина кристалла — все эти данные не противоречат друг другу.

Но, обнаружив такую же картинку для полимера, можно сначала попасть в тупик. Дело в том, что толщина слоев полиэфира равна 100—120 Å, а длина молекулы равна 6000 Å. Какой же вывод можно сделать из этих цифр? Да всего лишь один — в этих кристалликах молекулы складываются. Гибкость молекул позволяет им изогнуться без труда, и поэтому остается лишь раздумывать (раздумывание продолжается и до сих пор), какая из трех моделей, показанных на рис. 9.6, лучше. Различие между ними, конечно, второстепенное... Впрочем, специалист обидится. «Как же второстепенное,— скажет он,— на верхнем снимке молекулы загибаются, как попало, минуя ближайших соседей, на второй модели при сворачивании молекула становится соседкой самой себе. Различие между второй и третьей моделью заключается в том, что на среднем рисунке поверхность кристалла более гладкая, чем на нижнем».

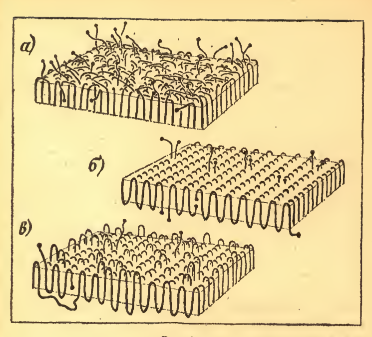


Рис. 9.6.

Специалист прав: характер укладки полимерных молекул имеет исключительно важное значение и кардинальным образом влияет на свойства вещества. Хотя полиэтилен, нейлон и другие материалы синтезированы впервые несколько десятков лет назад, изучение их надмолекулярной структуры и исследование приемов, заставляющих молекулы упаковываться разным образом, ведется и сейчас многими исследователями.

МЫШЕЧНОЕ СОКРАЩЕНИЕ

Мы закончим разговор о больших молекулах рассмотрением одного из примеров, показывающих, как работают макромолекулы в живом организме.

Биологи считали своей задачей объяснить соответствие формы живых органов — например, формы руки или листа дерева — функциями этого органа.

Физики, решившие использовать методы исследования строения вещества и законы природы, для изучения процессов, протекающих в живых организмах, стремятся понять жизнь на молекулярном уровне. Структура тканей может быть сегодня исследована весьма детально. После установления структуры становится возможным придумать модели биологических событий.

Достаточно существенными являются успехи в создании теории мышечного сокращения. Волокно мышцы состоит из двух типов нитей: тонких и толстых (рис. 9.7, *а*). Толстые нити состоят из белковых молекул, называемых миозином. Физики установили, что молекула миозина имеет форму палочки, заканчивающейся утолщением. В толстой нити молекулы сходятся хвостами в центре (рис. 9.7, *в*). Тонкие нити состоят из актина, структура которого напоминает две ниточки бус, которые образуют двойную спираль. Сокращение заключается в том, что толстые нити вдвигаются в тонкие.

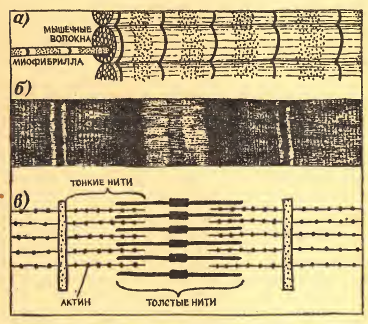


Рис. 9,7.

Детали этого механизма известны, но мы не можем на них останавливаться. Сигнал к сокращению подается нервным импульсом. Его приход освобождает атомы кальция, которые переходят от одной части нити к другой. В результате молекулы поворачиваются друг к другу так, что становится энергетически выгодным вдвижение одной гребенки молекул в другую. На рисунке приведены две схемы, а между ними электронномикроскопический снимок (рис. 9.7, *б*).

Боюсь, что эта страница дает слабое представление о детальности, с которой изучен механизм мускульного сокращения. Но мы и хотели лишь одного — заинтересовать читателя. Рассматривайте эту последнюю страницу книги, посвященной молекулам, как заявку на детальный разговор о биологической физике, который мы надеемся повести в одном из последующих выпусков «Физики для всех».

Лев Давидович Ландау
Александр Исаакович Китайгородский

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ

Книга 2

МОЛЕКУЛЫ

М., 1978 г., 208 стр. с илл.

Редактор Н. А. Михалина
Художник П. И. Чернуский
Художественный редактор Т. Н. Кольченко
Технический редактор В. Н. Кондакова
Корректоры З. В. Автокеева, Н. В. Хрипунова

ИБ № 11159

Сдано в набор 27.01.78. Подписано к печати 23.05.78. Т-10378. Бумага 84×108 1/32, тип. № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Условн. печ. л. 10,92. Уч.-изд. л. 10,29. Тираж 400 000 экз.

Заказ № 2363. Цена книги 40 коп.

Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома
при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28


ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ
Цена 40 коп.